

Untersuchung von Einflussfaktoren bei der Staubreduzierung durch Bedüsung am Beispiel der schneidenden Gewinnung im Steinkohlenbergbau

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ron Alexander Spier
aus Lehrte

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

der Technischen Universität Clausthal

Vorsitzende/Vorsitzender der Promotionskommission
Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer

Hauptberichterstatter
Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Berichterstatter
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Bauer

Tag der mündlichen Prüfung
25. November 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung und Abgrenzung	2
3	Staub im Gewinnungsbereich und Staubmesstechnik	3
4	Bedüsung zur Staubreduzierung.....	12
4.1	Grundlagen der Düsentechnik.....	12
4.2	Staubbindung.....	16
5	Einflussfaktoren auf die Staubreduzierung bei Bedüsungssystemen	21
5.1	Düsentechnik.....	22
5.1.1	Strahlbildende Einstoffdüsen	23
5.1.2	Lamellenbildende Einstoffdüsen	26
5.2	Betriebsparameter von zerstäubten Flüssigkeiten.....	28
5.2.1	Betriebsparameter Volumenstrom	28
5.2.2	Betriebsparameter Spritzwinkel	29
5.2.3	Betriebsparameter Strahlkraft	31
5.2.4	Betriebsparameter Tropfengröße.....	31
5.2.5	Betriebsparameter Flüssigkeitsdruck	33
5.2.6	Betriebsparameter Stoffeigenschaften.....	34
5.3	Äußere Einflussfaktoren.....	36
5.4	Zusatzstoffe.....	37
6	Bedüsungseinrichtungen im Gewinnungsbereich	40
6.1	Bedüsungseinrichtungen bei der schälenden Gewinnung	40
6.2	Bedüsungseinrichtungen bei der schneidenden Gewinnung	42
7	Darstellung der Ergebnisse von Referenzversuchen	46
7.1	Untersuchungen zur Walzenbedüsung.....	46
7.2	Untersuchung zur Hobelgassenbedüsung	56
7.3	Äußere Einflussfaktoren und Tenside.....	59

8	Ergebnis der Referenzversuche	62
9	Abbildung des Gesamtsystems Staubreduzierung durch Bedüsung in einem Windkanal.....	66
9.1	Grundlegender Aufbau	66
9.2	Nachbildung des Gesamtsystems der Staubreduzierung durch Bedüsung.....	73
9.2.1	Bedüsungseinrichtungen im Versuchsstand.....	74
9.2.2	Staubentstehung im Versuchsstand.....	82
9.2.3	Darstellung der Umgebungseinflüsse	92
9.3	Messtechnik	95
9.3.1	Tropfenanalyse.....	96
9.3.2	Messung der Staubkonzentrationen	99
9.3.3	Ermittlung der Umgebungseinflüsse.....	111
9.4	Datenerfassung	115
9.5	Bewertung des Versuchskanals.....	116
10	Untersuchung wesentlicher Einflussfaktoren	122
10.1	Einflussfaktor Betriebsparameter.....	123
10.1.1	Wasserdruck.....	123
10.1.2	Volumenstrom	123
10.1.2.1	Druckbedingte Änderung	123
10.1.2.2	Änderung des Düsendurchmessers.....	126
10.1.3	Tropfengröße.....	129
10.1.3.1	Druckbedingte Änderung	129
10.1.3.2	Änderung des Düsendurchmessers.....	134
10.1.4	Optimierung der Staubbindung durch die Betriebsparameter.....	135
10.2	Untersuchung der äußeren Einflussfaktoren anhand der 0,7 mm Düse ..	138
10.2.1	Äußere Einflussfaktoren bei konstanter Luftgeschwindigkeit	138
10.2.2	Äußere Einflussfaktoren bei unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit .	143
10.3	Zusatzstoffe.....	146
11	Bewertung der wesentlichen Einflussfaktoren und deren Abbildung im Versuchsstand	149

12	Ausblick.....	155
12.1	Untersuchungen im Bereich der Steinkohlengewinnung	155
12.2	Potentielle Einsatzbereiche im untertägigen Bergbaubereich	158
13	Zusammenfassung	160
14	Abstract.....	165
15	Literaturverzeichnis.....	167

Vorwort

Die Grundlage zu dieser Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsvorhabens während meiner Tätigkeit am Institut für Bergbau TU Clausthal, das durch die RAG Deutsche Steinkohle AG gefördert wurde; dem Unternehmen dafür herzlichen Dank. Für die Betreuung und Unterstützung bei dieser Arbeit möchte ich mich bei Professor O. Langefeld bedanken. Herrn Professor M. Bauer danke ich für die Übernahme des Korreferats und die wertvollen Anregungen.

Die Zeit am Institut hat mir sehr viel Freude gebracht und ich möchte all meinen Kollegen bedanken für Ihre Unterstützung bei dieser Arbeit bedanken. Durch die tatkräftige und anregende Unterstützung der Mitarbeiter der Werkstätten am Institut für Bergbau konnte dieser Versuchsstand erst realisiert werden. Erwähnt seine hier in Vertretung aller Mitarbeiter die Herren Wolfgang Kierig, Wolfgang Fischer und Wolfgang Exner. Des Weiteren sei den Studenten für ihren intensiven Einsatz gedankt, die in zeitraubenden Versuchsreihen das „Datengerüst“ zu dieser Arbeit schufen.

Für Ihre fachlichen Anregungen und Unterstützung möchte ich auch den Herren Cebula, Pötsch, Südhofer und Trappe, der RAG Deutsche Steinkohle AG, Herrn Löhning DMT, Herrn Henke PKG Prüf- und Kalibriertechnik GmbH sowie Herrn Richter, TFH Acricolae Bochum danken.

Nicht vergessen möchte ich meinen Freunden zu danken, die mich ermutigend begleitet haben und manchen Zweifel aus dem Weg geräumt haben. Zuletzt, aber umso bedeutender, möchte ich meinen Eltern und meinem Bruder Dank sagen; Ihre Begleitung nicht nur bei dieser Arbeit war mir in vielerlei Hinsicht eine große Unterstützung.

Gewidmet all denen, die mich auf meinem Wege begleitet haben!

Lehrte im Dezember 2010

1 Einleitung

Einflüsse durch Klima und Staub stellen für die Beschäftigten im Steinkohlenbergbau eine große Belastung dar. Deshalb wurden in der Vergangenheit verschiedene Untersuchungen in Bezug auf die Staubreduzierung vorgenommen. Es wurden unter anderem Düsenbauformen hinsichtlich ihrer Staubbindeeffektivität, Betriebsparameter, die Verwendung von Zusatzstoffen (Tensiden) und die Auswirkung von Temperaturunterschieden beim Bedüsungswasser bzw. auf die Umgebung untersucht. Neben diesen Untersuchungen wurde auch die Aufnahme von Bedüsungswasser in die Umgebungsluft theoretisch betrachtet.

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse der Versuche ist nicht möglich, da die Versuchsbedingungen (Aufbau des Messumfelds, Messinstrumente, Staubaufgabe etc.) nicht immer identisch waren. Zudem wurden die Einflussfaktoren und deren Auswirkungen nicht zusammenhängend beurteilt. Für diese Bewertung wurde ein Versuchsstand konzipiert, der einheitliche Versuchsbedingungen darstellt und die wichtigsten Einflussgrößen abbilden kann.

Im Folgenden werden zunächst die Einflussfaktoren Grubenklima und Staubentstehung bzw. Staubbindung dargestellt. Im Anschluss daran werden die bisher veröffentlichten Ergebnisse zur Staubreduzierung beschrieben. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein neuer Versuchskanal entwickelt, dessen Entwicklung sowie Aufbau- und Funktionsweise im Rahmen dieser Arbeit erörtert wird. Ziel ist es, möglichst viele Einflussfaktoren realitätsnah abzubilden.

Mit dem so konzipierten Kanal werden schließlich verschiedene Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Staubreduzierung simuliert. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse über die Auswirkungen der wesentlichen Einflussparameter werden abschließend untersucht und qualitativ bewertet.

2 Aufgabenstellung und Abgrenzung

Um den bei der Gewinnung und Förderung entstehenden Staub im Steinkohlenbergbau zu minimieren, werden u. a. Bedüsungseinrichtungen eingesetzt. Um diese zu optimieren, wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Versuchen - im Folgenden Referenzversuche genannt - mit unterschiedlichen Versuchsaufbauten durchgeführt (vgl. Kapitel 7). Dabei wurden verschiedene Faktoren, wie Einfluss des Bedüsungswasserdrucks, die Luftzuführung bei der Ejektordüse, Tropfengröße, die Wärme des Wassers etc. jeweils in separaten Versuchsreihen betrachtet. Diese und andere Einflussfaktoren sind notwendig für die Beurteilung von Bedüsungssystemen. Betrachtet man neben den unmittelbaren Auswirkungen der Einflussfaktoren auch die möglichen Wechselwirkungen, so lassen sich realitätsnahe Aussagen zu einem Staubreduzierungssystem treffen.

Alle Auswirkungen sowohl der Einflussfaktoren an sich als auch deren Wechselwirkungen lassen sich zu einem Gesamtsystem Staubreduzierung durch Bedüsung zusammenfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Aufbau eines Wetterkanals unter dem Gesichtspunkt der Darstellung vergleichbarer Versuchsbedingungen erörtert und beschrieben. Am Beispiel der schneidenden Gewinnung werden anschließend die möglichen Wechselwirkungen der Einflussfaktoren aufgezeigt und deren Auswirkungen bewertet. Dabei soll nicht die quantitative Beurteilung der Staubreduzierung im Vordergrund stehen, sondern die auf das Gesamtsystem Staubreduzierung durch Bedüsung einwirkenden Einflussfaktoren und deren Wechselwirkungen.

3 Staub im Gewinnungsbereich und Staubmesstechnik

In einem untertägigen Gewinnungsbetrieb ist die Entstehung von Staub allgegenwärtig. Er entsteht zum größten Teil beim Gewinnungsprozess. Neben dem dabei entstehenden Kohlenstaub wird beim Mitschnitt des Nebengesteins u. a. auch Quarzfeinstaub freigesetzt. Ein weiterer Teil des Staubs ist aber auch im Flöz originär eingelagert. Infolge tektonischer Bewegungen hat sich Kohlenstaub auf geologischen Störzonen bzw. in Kluftträumen, den sogenannten Schlechten, abgelagert.

Während sich gröbere Staubkörner in der Umgebung der Quelle ablagern, wird feineres flugfähiges Material wetterstromabwärts und zum Teil auch aus dem Streb gefördert /42/. Entlang des weiteren Förderwegs der Kohle kommt es insbesondere an Übergaben zur weiteren Staubeinstehung.

Vom Kohlenstaub gehen unterschiedliche Gefahren aus: Er kann bei entsprechenden Umgebungsbedingungen als Brandstoff wirken. Eine weitere Gefahr ist die gesundheitsschädigende Wirkung des mit der Luft eingeatmeten Staubs (Silikose). Im Gegensatz zu Schlagwettern, die per Definition ein explosionsfähiges Grubengas-Luft-Gemisch darstellen, ist abgelagerter Kohlenstaub zunächst nicht explosibel. Das Auslösen einer Explosion setzt hier das Vorhandensein eines Kohlenstaub-Luft-Gemisches genügender Konzentration und das Einwirken einer Zündquelle mit ausreichender Energie voraus.

Beim Einatmen von Staub gelangen die Partikel je nach Korngröße in unterschiedliche Organe. Etwa die Hälfte des eingeatmeten Staubs mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 μm wird in Nase, Rachen und Kehlkopf abgelagert. Dieser Staub wird auch als E-Staub (=einatembarer Staub) bezeichnet. Auf der anderen Seite gibt es den A-Staub, den alveolengängigen Feinstaub, von dem eine größere Gefahr ausgeht. Diese Partikel haben einen aerodynamischen Durchmesser von ca. 5 – 6 μm und gelangen bis in die Lungenbläschen (Alveolen), wodurch Krankheiten (z.B. Silikose) hervorgerufen werden können /42; 1/ (Abbildung 1).

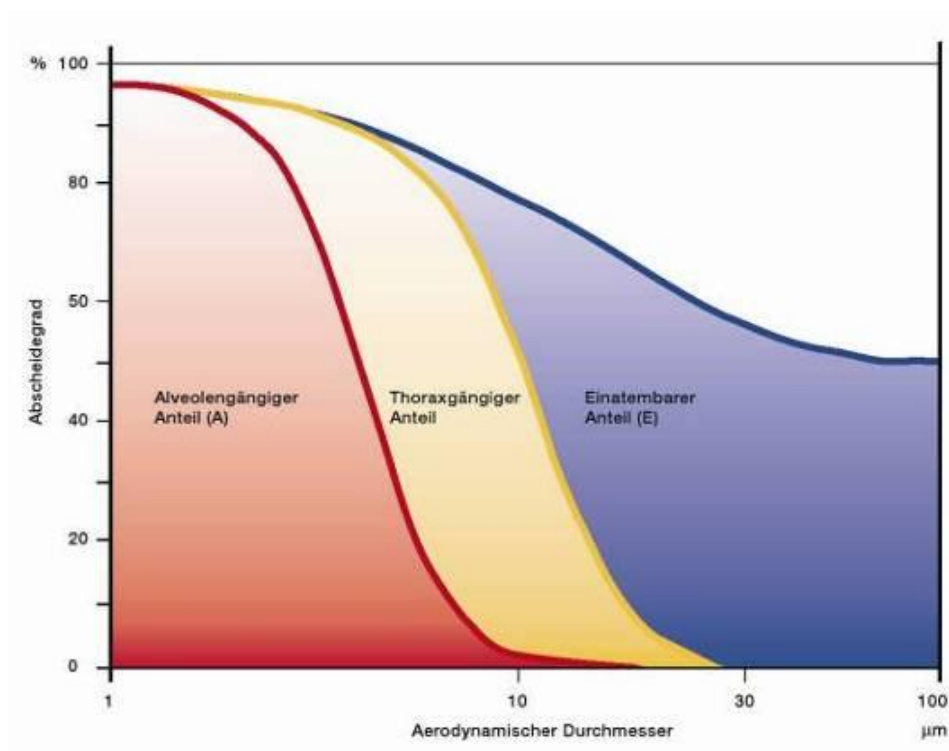


Abbildung 1: Abscheidegrad zu aerodynamischem Durchmesser /43/

Die Bewertung des Staubs nach geometrischen Größen, wie dem aerodynamischen Durchmesser, sagt lediglich etwas über den Ablagerungsort, nicht aber über das biologische Wirkungsverhalten aus. Für die lungenschädigende Wirkung werden vielmehr die Konzentration an alveolengängigem Feinstaub in der Atemluft und der darin enthaltene Quarzanteil für eine Beurteilung herangezogen. Maßgebend sind dabei die Massenkonzentrationen.

In der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS 900), die für Feinstäube in der Luft am Arbeitsplatz Grenzwerte (Arbeitsplatzgrenzwerte) festlegt, sind die allgemeinen Staubgrenzwerte festgelegt. Für die alveolengängige Fraktion (A-Staub) liegt der Wert bei 3 mg/m³. Dies ist ein Mittelwert für die Dauer einer Arbeitsschicht von täglich 8 Stunden an 5 Tagen in der Woche während der Lebensarbeitszeit. Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) ist der Grenzwert für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes (chemischen Elementes) in der Luft am Arbeitsplatz (§ 3 Abs. 6 GefStoffV), unterhalb dessen ein Gesundheitsrisiko nicht befürchtet wird.

Im Bergbau ist der Grenzwert durch die Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung) für quarzhaltigen Feinstaub auf 4 mg/m^3 festgelegt. Die Staubbelastung wird anhand der persönlichen Staubbelastungswerte und den ortsgebundenen Staubbelastungsstufen bewertet.

Die Staubbelastungsstufen beschreiben den Grad der Verstaubung am jeweiligen Arbeitsplatz. Anlage 7 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung unterscheidet hier 4 Stufen (Tabelle 1).

Staubbelastungsstufe	Konzentration an quarzhaltigem Feinstaub [mg/m^3]	Konzentration an Quarzfeinstaub [mg/m^3]
0	$\leq 2,0$	$\leq 0,10$
1	$> 2,0 - 4,0$	$> 0,10 - 0,20$
2	$> 4,0 - 6,0$	$> 0,20 - 0,30$
3	$> 6,0 - 8,0$	$> 0,30 - 0,40$

Tabelle 1: Staubbelastungsstufen nach der Gesundheitsschutz-Bergverordnung /12/

Darüber hinaus gibt es im arbeitsmedizinischen Bereich sogenannte Lungenfunktionsparameter, wie „Forcierte Vitalkapazität (FVC)“, „Forcierte Einsekundenkapazität (FEV_1)“ und „FEV in Prozent von der FVC“. Der FEV_1 Wert gibt die eingeatmete und der FVC die ausgeatmete Luftmenge an. Anhand des Verhältnis „FEV in Prozent von der FVC“ können Lungenfunktionsstörungen ermittelt werden. Dieser Kennwert korreliert mit dem Kohlenstaub-A-Gehalt /25/.

Für eine Bewertung müssen die Konzentrationen an lungengängigem Feinstaub und der im Feinstaub enthaltene Quarzanteil bestimmt werden, wofür unterschiedliche optische und gravimetrische Staubbmessgeräte zum Einsatz kommen.

Als optische Staubbmessgeräte werden Tyndallometer verwendet, die nach dem

Prinzip der Streulichtmessung arbeiten. In der Deutschen Steinkohle sind Geräte der Firma Hund, Wetzlar eingesetzt. Das Messgerät Typ TM digital μP misst die im Laufe der Messdauer ermittelten (Augenblicks-)Intensitätswerte und bildet aus diesen einen Mittelwert. Das baugleiche Messgerät TM data bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Einzelmesswerte in einem integrierten elektronischen Speicher abzulegen und später nach Abschluss der Messung in einen Computer einzuspeichern. Für die weitere Auswertung am Computer stehen geeignete Programme (z. B. zur graphischen Darstellung des Konzentrationsverlaufs, der Mittelwertbildung, auch von Teilmesszeiten) zur Verfügung (Abbildung 2).



Abbildung 2: Tyndallometer TM digital μP der Firma Hund /6/

Zum Messen wird ein unsichtbarer Lichtstrahl (Infrarotlicht) durch eine offene Messkammer gelenkt. Ein seitlich des Strahlengangs angeordneter Detektor misst die Intensität des Streulichts, welches durch Staubpartikel in der Messkammer erzeugt wird. Die Lichtfallen im Strahlengang verhindern, dass reflektiertes Licht in die Optik des Detektors gelangt, was zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen wür-

de (Abbildung 3).

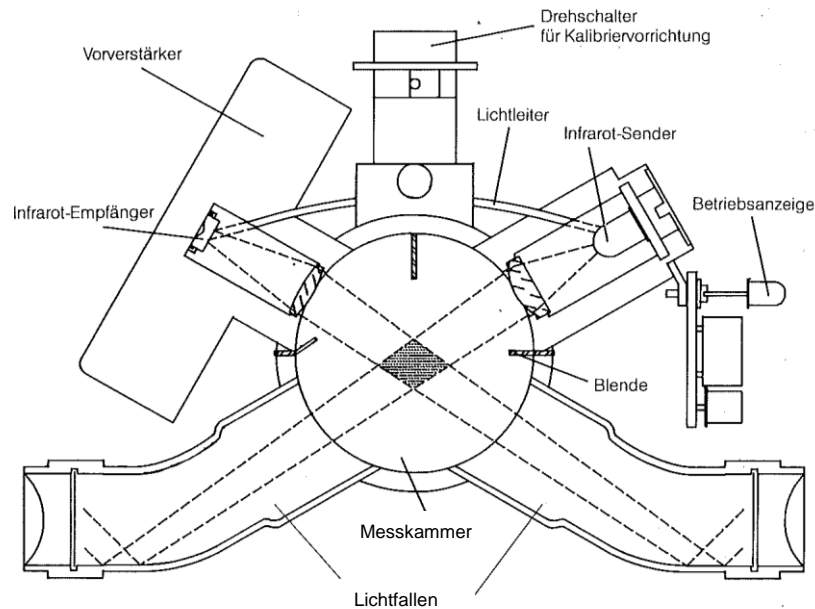


Abbildung 3: Messkammer eines Tyndallometers Typ TM digital µP bzw. TM Data der Firma Hund /6/

Zwischen der gemessenen Lichtintensität und der Konzentration des Staubes wurden Zusammenhänge ermittelt. Die Umrechnungsfaktoren sind u. a. von gesteinspezifischen Parametern, der Partikelgrößen-Verteilung und betriebstechnischen Bedingungen abhängig. Derzeit gibt es keine allgemeingültigen Umrechnungsfaktoren, wodurch Vergleichsmessungen mit gravimetrischen Messinstrumenten gesetzlich vorgeschrieben sind /33, 42; 12; 1/. In Abbildung 4 ist ein linearer Zusammenhang als Ergebnis einer Vergleichsmessung zwischen gravimetrischer und tyndallometrischer Feinstaubmessung dargestellt.

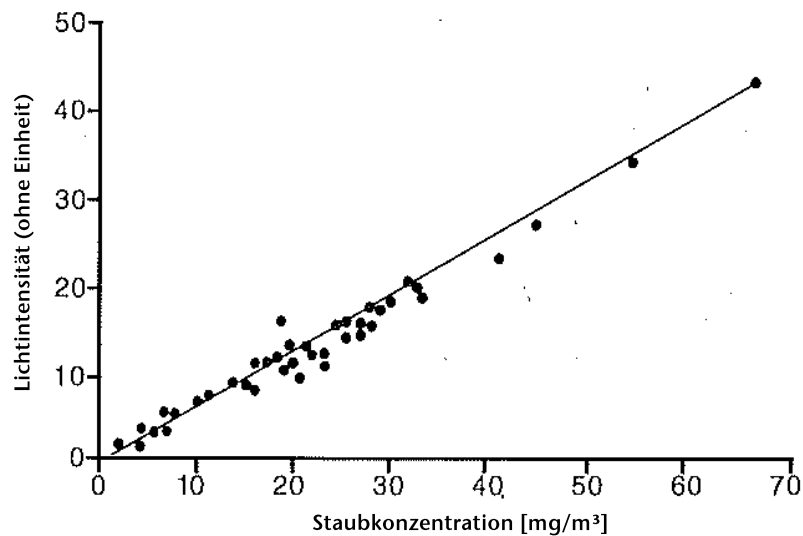


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Staubkonzentration /6/

Aufgrund des Messprinzips ist ein tyndallometrisches Messgerät nicht dazu geeignet, den Quarzanteil im Feinstaub zu bestimmen. Darüber hinaus entspricht die Messcharakteristik nicht in vollem Umfang der Johannesburger Kurve (Abbildung 5).

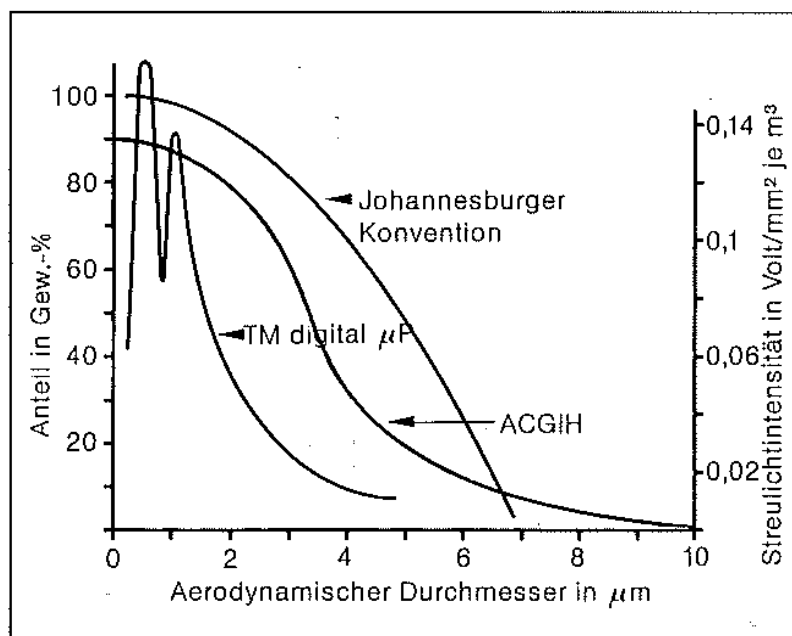


Abbildung 5: Bewertungskurve des TM digital im Vergleich zu der Johannesburger Konvention und der American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) /6/

Zu den gravimetrischen Staubprobenahmegeräten gehört beispielsweise das MPG II der Firma Wazau, Berlin. Hier wird der Staub durch die saugende Wirkung eines an das Druckluftnetz angeschlossenen Ejektors mit einer Luftmenge von ca. 46 l/min in das Gerät befördert. Mit einem horizontalen Sedimentationsabscheider, einem sogenannten Elutriator, wird der Feinstaub vom Gas abgetrennt. Der Abscheider besteht aus planparallelen Membranfilterplatten (Abbildung 6).

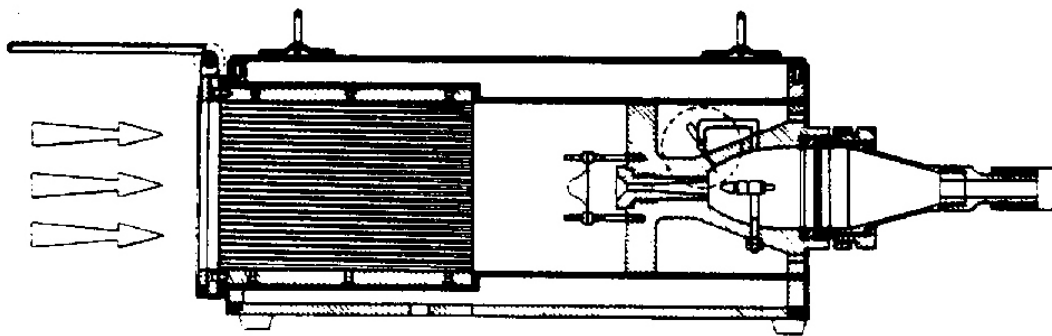


Abbildung 6: Längsschnitt durch das Gerät MPG II /33/

Die Genauigkeit der Messung hängt im Wesentlichen von der Einhaltung einer vorgegebenen Verteilung der Plattenabstände und des Luftdurchsatzes ab. Je gröber der Staub, umso stärker wirken sich Abweichungen auf das Messergebnis aus /33, 42/.

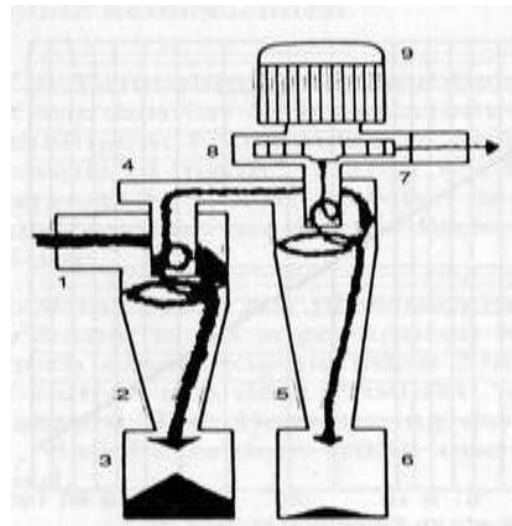
Die Membranfilter werden anschließend gewogen und die stoffliche Zusammensetzung ermittelt. Die Feinstaubkonzentration wird nach folgender Formel ermittelt /33/.

$$c = \frac{m}{\dot{V} \cdot t}$$

c	= Feinstaubkonzentration	[mg/m ³]
m	= Masse	[mg]
\dot{V}	= Volumenstrom des Probenahmegeräts	[m ³ /min]
t	= Dauer der Probenahme	[min]

Formel 1: Bestimmung der Feinstaubkonzentration

Ein weiteres im Steinkohlenbergbau eingesetztes gravimetrisches Staubbmessgerät stellt das TBF 50 der Firma Mollidor und Müller, Köln, dar. Dieses Gerät besteht im Wesentlichen aus zwei hintereinandergeschalteten Zyklonen (Abbildung 7).



- | | | |
|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| 1 Ansaugkanal | 4 Übergang | 7 Verbindungsstück |
| 2 Grobstaub-Zyklon | 5 Feinstaub-Zyklon | 8 Gebläse (wenn Eigenantrieb) |
| 3 Grobstaub-Topf | 6 Feinstaub-Topf | 9 Motor (wenn Eigenantrieb) |

Abbildung 7 : TBF 50 der Firma Mollidor und Müller

Die Luft wird bei einer Geschwindigkeit von rd. 2,5 m/s bzw. durch einem Volumenstrom von 50 l/min mithilfe eines Druckluft-Ejektors angesaugt. Im ersten Zyklon wird Grobstaub abgeschieden, der den in den oberen Luftwegen abgelagerten Staubanteil repräsentiert. Im anschließenden Zyklon wird der Feinstaub abgeschieden.

In der Tabelle 2 werden die Eigenschaften der beiden Messverfahren zusammenfassend dargestellt.

Messverfahren	Gravimetrie	Tyndallometrie
Messprinzip	Sammeln des Staubes	Messen des Streulichtes
Messgröße	Konzentration (mg/m^3)	Intensität (I)
Staubfraktion	einatembar, alveolengängig	alveolengängig
Anzahl der Messwerte	ein Mittelwert	Einzel- und Mittelwerte
Staubanalyse	mineralische Bestandteile, Anhydrit, Asche	nicht möglich
Störfaktoren		Rauch und Wasserdampf
Messwerte	frühestens 2,5 Std. nach Messende	sofort

Tabelle 2: Vergleich Tyndallometrie und Gravimetrie

4 Bedüsung zur Staubreduzierung

4.1 Grundlagen der Düsenteknik

Ein Bedüsungsstrahl stellt ein Tropfenkollektiv dar. Bei der Tropfenbildung lassen sich folgende Mechanismen unterscheiden /57/:

- 1 Abtropfen von Flüssigkeiten
- 2 Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen
- 3 Lamellenzerfall
- 4 Zerstäubung von Flüssigkeiten durch Gase

Das Abtropfen aus einem Flüssigkeitsstrahl stellt die einfachste Art einer monodispersen Tropfenbildung dar. Dabei fließt eine Flüssigkeit mit äußerst geringer Geschwindigkeit aus einer runden Öffnung bzw. Düse und unter Einwirkung der Schwerkraft bilden sich Tropfen aus (Abbildung 8).

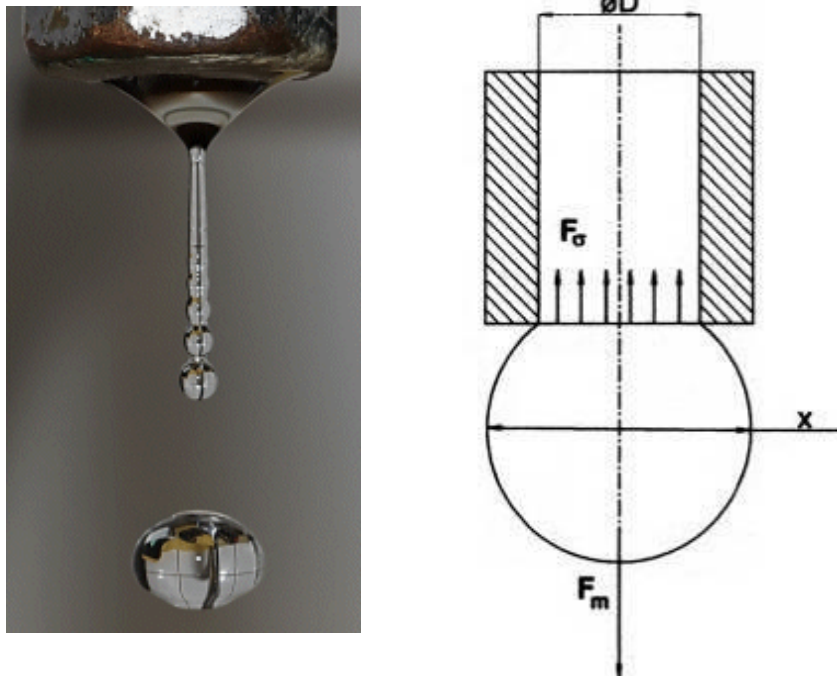


Abbildung 8: Angreifende Kräfte bei der Tropfenbildung /43, 4/

Nimmt die Flüssigkeitsgeschwindigkeit zu, kommt es zum Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen. Zunächst tritt ein Flüssigkeitsstrahl aus. Durch wellenförmige Schwingungen werden kurze Flüssigkeitsfäden ausgebildet, die dann, aufgrund der Oberflächenspannung, in eine Tropfenform übergehen. Dieser Vorgang wird als Zerwellen bezeichnet. Tritt der Strahl schließlich mit sehr hohen Geschwindigkeiten aus, zerfällt er unmittelbar am Düsenmund. Dieser Vorgang stellt das Zerstäuben dar (Abbildung 9).

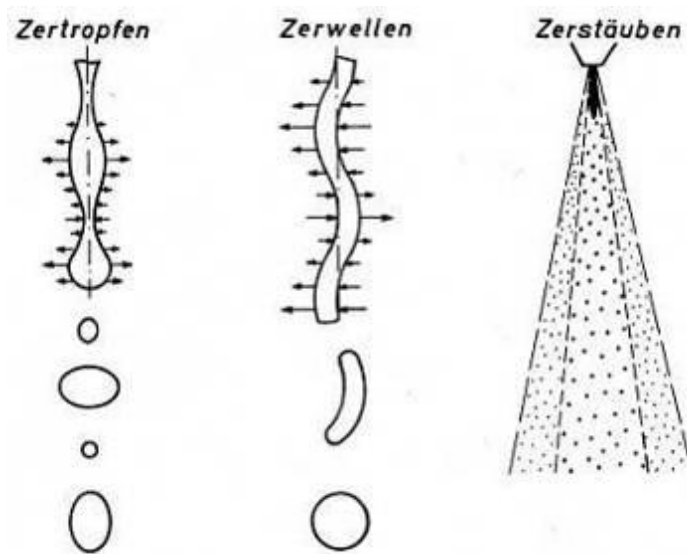


Abbildung 9: Formen des Strahlzerfalls /23/

Durch geeignete konstruktive und strömungstechnische Gestaltung der Austrittsöffnung lassen sich nicht nur Flüssigkeitsstrahlen, sondern auch Flüssigkeitslamellen ausbilden. Diese Lamellen zerfallen nach einem ähnlichen Mechanismus wie beim Strahlzerfall. Im Vergleich zu strahlbildenden Düsen entstehen dabei feinere Tropfen, bei sonst identischen Betriebsbedingungen (Betriebsdruck, rheologische Eigenschaften der Flüssigkeit und Bohrungsdurchmesser) /43/.

Eine einfache Art, eine Flüssigkeitslamelle zu erzeugen, besteht darin, einen Flüssigkeitsstrahl aus einer Düse senkrecht auf eine Platte aufzutreffen zu lassen und ihn so allseitig umzulenken (Abbildung 10).

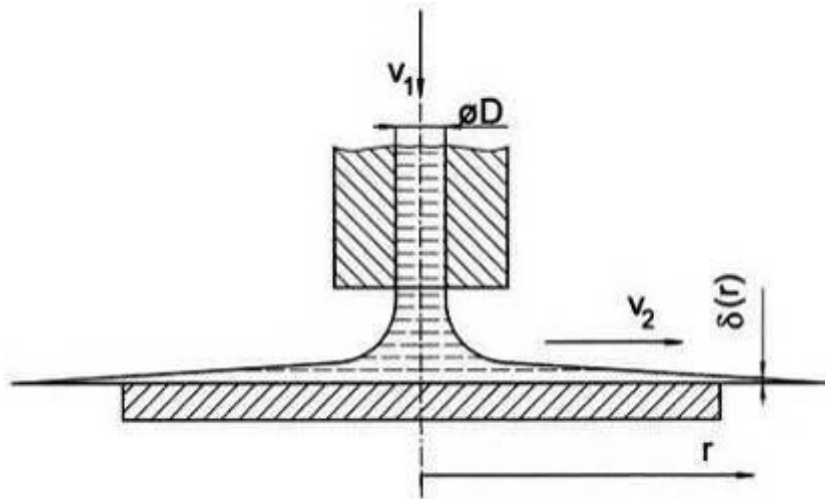


Abbildung 10: Umlenken eines Flüssigkeitsstrahls auf einer Prallplatte /43/

Die in Abbildung 10 dargestellte Düse erzeugt naturgemäß einen großen Spritzwinkel von $\Theta = 360^\circ$. Die horizontal austretende Flüssigkeitslamelle krümmt sich erst mit zunehmender Entfernung vom Plattenrand. Um den Spritzwinkel zu reduzieren, lässt sich ein Kegel als Prallkörper einsetzen, der einen beliebigen Spritzwinkel erzeugt (Abbildung 11) /43, 57/.

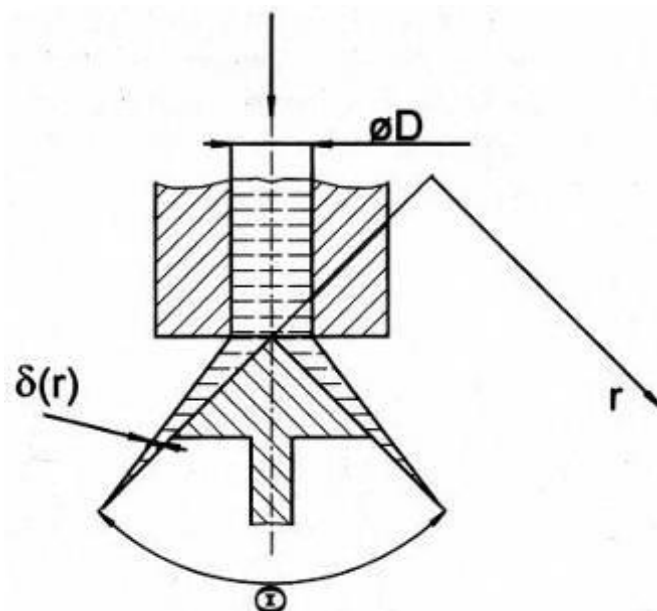


Abbildung 11: Kegelförmiger Prallkörper /43/

Eine Lamelle ist also zunächst ein geschlossener Flüssigkeitsfilm, der sich kegelförmig von der Düse bzw. Prallplatte ausgehend ausbildet. Die Schichtdicke δ nimmt

mit zunehmender Entfernung von der Düsenmündung ab. Durch die Instabilität der Lamelle kommt es zur Ausbildung von sinusförmigen Wellen, wodurch schließlich Flüssigkeitsfäden ausgebildet werden, die größer sind als die Schichtdicke der Lamelle. Wie beim Strahlzerfall bewirkt die Oberflächenspannung schließlich die Umwandlung in Tropfen (Abbildung 12 und Abbildung 13).

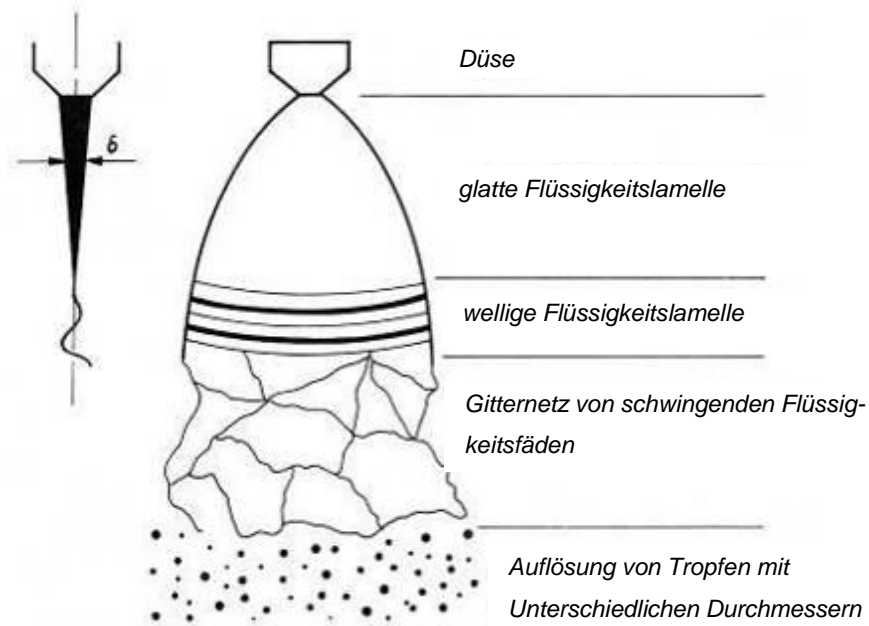


Abbildung 12 : Tropfenentstehung nach dem Lamellenzerfallsprinzip /23/

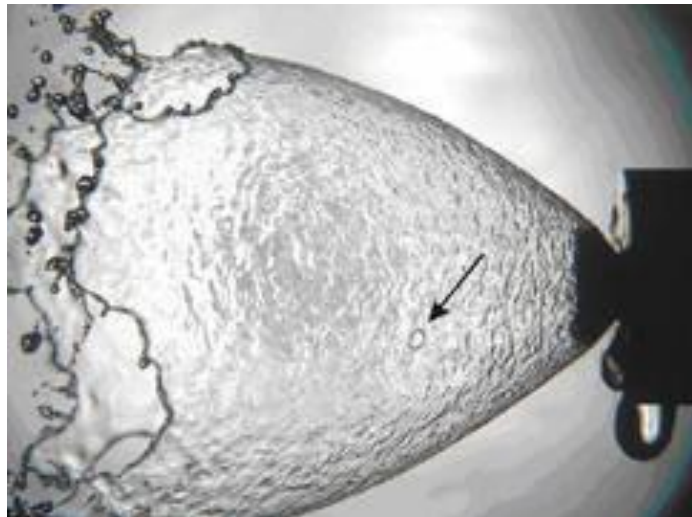


Abbildung 13: Lamellenzerfall an einer Düse /4/

4.2 Staubbinding

Für eine gute Staubbinding ist zum einen eine große Flüssigkeitsoberfläche erforderlich und zum anderen eine hohe Anzahl an Tröpfchen, damit ein hoher Auftreffgrad erreicht wird. Für das Zerstäuben bedeutet diese Anforderung, dass möglichst kleine Tropfen erzeugt werden müssen (Tabelle 3).

Die Zerstäubung von 1l Wasser ergibt	
bei Tropfen von	eine Oberfläche von
110 µm	5,45 m ²
30 µm	20,30 m ²
12 µm	50,20 m ²

Tabelle 3: Vergleich der Flüssigkeitsoberfläche bei unterschiedlichen Tropfengrößen /9/

Voraussetzung für die Anlagerung von Tröpfchen an einen Staubpartikel ist, dass sie sich auf Kollisionskurs befinden und eine hohe Relativgeschwindigkeit zueinander besitzen. Andernfalls werden Staubpartikel mit sehr geringer Masse von der Luft mitgerissen, von Wassertropfen in ihrer Bewegungsbahn verdrängt und auf Stromlinien um den Tropfen herumgeführt, ohne dass dabei eine Benetzung stattfindet. Ähnliches gilt auch für das Größenverhältnis von Staubpartikeln und Tropfen. Wenn Tropfen und Partikel ähnlich groß sind, „umsegeln“ die Staubpartikel den Tropfen nicht, sondern haften an der Fluidoberfläche (Abbildung 14) /56/.

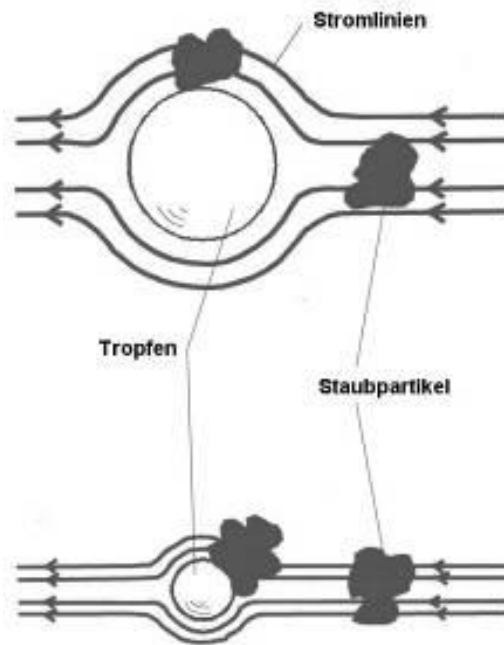


Abbildung 14: Vergleich der Staubabscheidung bei groben und feinen Tropfen /56 /

Staubbindung mit zerstäubten Flüssigkeiten entspricht dem verfahrenstechnischen Prozess eines Nassabscheiders. Dabei sollen in einem Gas dispergierte Partikel auf eine Flüssigkeitsoberfläche treffen und dort durch Benetzung festgehalten werden.

Benetzung ist ein Verhalten von Flüssigkeiten beim Kontakt mit der Oberfläche von Festkörpern. Je nachdem, um welche Flüssigkeit es sich handelt, aus welchem Material die Oberfläche besteht und wie deren Beschaffenheit (z. B. Rauigkeit) ist, benetzt die Flüssigkeit die Oberfläche mehr oder weniger stark.

Ein auf einer horizontalen, ebenen Oberfläche aufgebrachtener Flüssigkeitstropfen veranschaulicht die Benetzung und ihre Unterteilung (Abbildung 15). Dabei ist die Benetzbarkeit von den Verhältnissen der beteiligten Oberflächenspannungen abhängig, die über die Young'sche-Gleichung mit dem Kontaktwinkel (Benetzungswinkel) in Beziehung stehen und diesen damit zum Maß für die Benetzbarkeit machen.

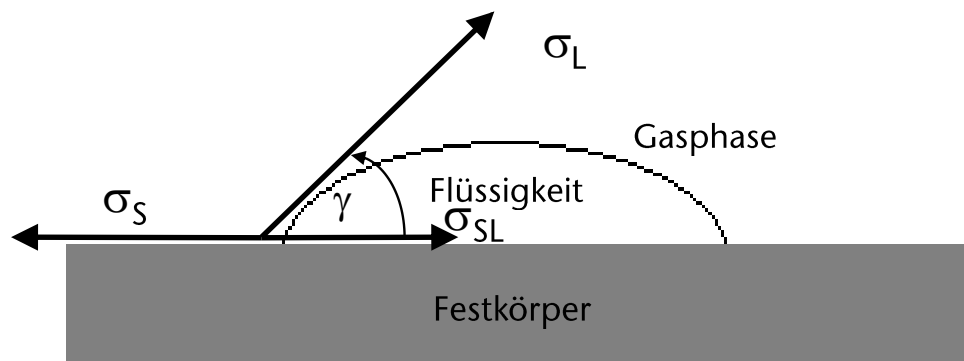


Abbildung 15: Benetzung

$$\cos \gamma = \frac{\sigma_S - \sigma_{SL}}{\sigma_L} = \frac{\sigma_H}{\sigma_L}$$

$$\cos \gamma \cdot \sigma_L = \sigma_H$$

γ	= Kontaktwinkel	[°]
σ_S	= Oberflächenspannung des Feststoffs	[N/m]
σ_L	= Oberflächenspannung der Flüssigkeit (Tropfen)	[N/m]
σ_{SL}	= Oberflächenspannung zwischen Feststoff und Flüssigkeit	[N/m]
σ_H	= Benetzungs- oder Haftspannung	[N/m]

Formel 2: Young-Laplace-Gleichung /46/

Aus dem Spannungsverhältnis am Tropfen ergibt sich, dass die Benetzungs- oder Haftspannung σ_H und die entlang der Feststoffoberfläche wirksame Komponente der Oberflächenspannung σ_S vom Kontaktwinkel γ abhängig sind.

Ein Kontaktwinkel von $\gamma = 90^\circ$ bzw. $\cos \gamma = 0$ kommt in der Natur nicht vor. Eine vollständige Benetzung liegt bei $\gamma = 0^\circ$ bzw. $\cos \gamma = 1$ vor. Die Flüssigkeit breitet sich auf der gesamten Oberfläche aus. Im Fall einer Benetzung muss der Kontaktwinkel zwischen 0° und 90° liegen. In diesem Fall sind die Adhäsionskräfte stärker als die die Flüssigkeit zusammenhaltenden Kohäsionskräfte.

In Bezug auf Kraftverhältnisse stehen sich also die Adhäsionskräfte zwischen den Atomen oder Molekülen der in Berührung gebrachten individuellen Stoffkombinationen Flüssigkeit-Festkörper-Gas und die Kohäsionskräfte innerhalb der Flüssigkeit gegenüber.

Beispiele für die Art der Adhäsionskräfte zeigen Versuche mit unterschiedlichen Kohlenproben. Der Kontaktwinkel zwischen dem Feststoff Kohle und dem Fluid hängt von dem Anteil flüchtiger Bestandteile und von der Korngröße ab (Abbildung 16 und Abbildung 17).

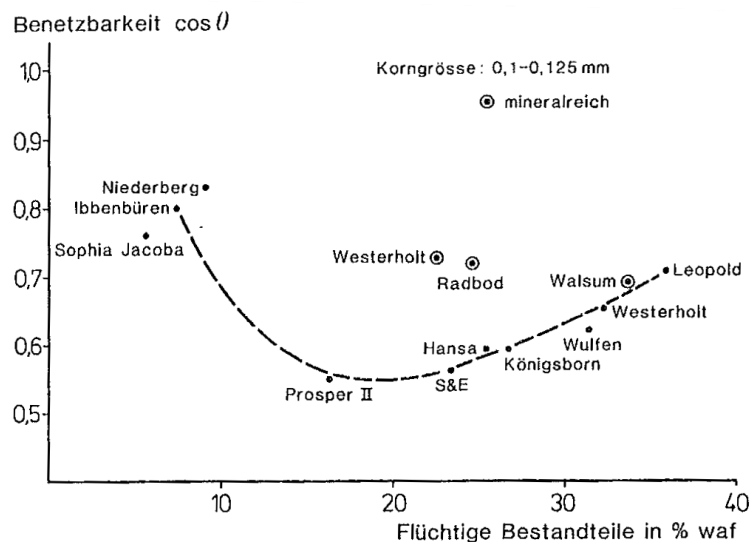


Abbildung 16: Benetzbarkeit verschiedener Kohleproben in Abhängigkeit zu den flüchtigen Bestandteilen /46/

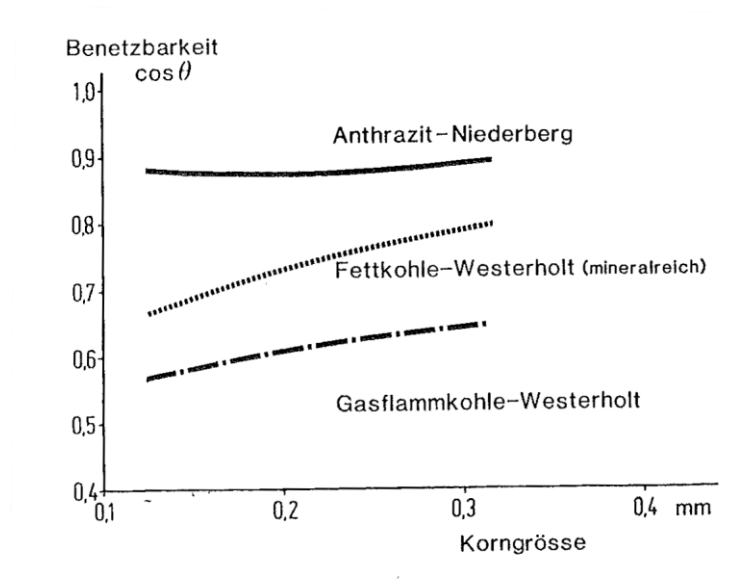


Abbildung 17: Benetzbarkeit in Abhängigkeit von der Korngröße /46/

Die Kohäsionskräfte bzw. die daraus resultierenden Oberflächenspannungen innerhalb der Flüssigkeit hängen dagegen von den Fluideigenschaften ab.

5 Einflussfaktoren auf die Staubreduzierung bei Bedüsungssystemen

Bei der Optimierung von Bedüsungseinrichtungen müssen die zugehörigen technischen Einflussfaktoren Berücksichtigung finden, daneben sollten aber auch die Auswirkungen auf die Umwelt und der Einfluss auf die nachfolgenden technischen Weiterverarbeitungsprozesse betrachtet werden (Abbildung 18).

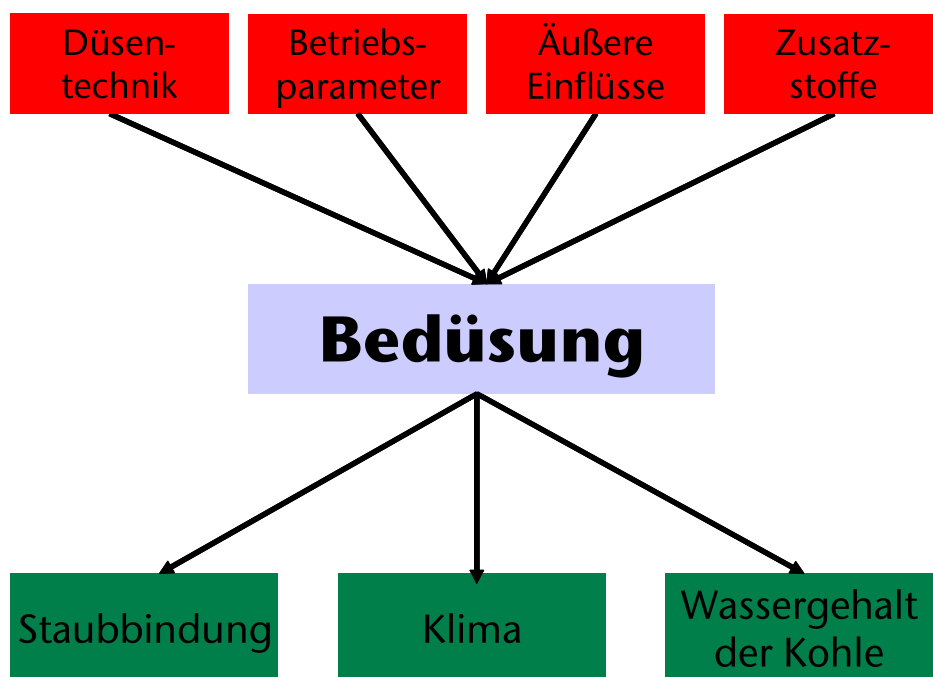


Abbildung 18: Einflussfaktoren und Auswirkungen der Bedüsung

Das Ergebnis der Staubreduzierung wird im Wesentlichen durch die folgenden Einflussfaktoren bestimmt:

- 1 Düsenteknik
- 2 Betriebsparameter (Druck, Volumenstrom etc.)
- 3 Äußere Einflussfaktoren (Luftströme, Wärmequellen etc.)
- 4 Zusatzstoffe (Tenside zur Veränderung der Oberflächeneigenschaften)

Neben der Staubreduzierung kommt es auch zu Auswirkungen auf das Klima und

den Wassergehalt der Kohle bzw. Förderung. Das Ziel der Verringerung des Staubgehalts in der Luft durch Bedüsung steht jedoch mit der Realisierung optimaler klimatischer Arbeitsbedingungen im Widerspruch. Mit viel Wasser und/oder feinen Tropfen lässt sich eine hohe Staubreduzierung in einem Abbau realisieren. Viel Feuchtigkeit bzw. fein verteilte Feuchtigkeit in einer warmen Umgebung führen hingegen zu einer Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und damit der Effektivtemperatur. Dadurch entsteht aus Sicht der Arbeitssicherheit und des Gesundheitsschutzes ein ungünstiges Arbeitsumfeld. Ähnliches gilt auch für den Wassergehalt in der Förderung. Je mehr Wasser versprüht wird, desto mehr Wasser ist in der Förderung und belastet die nachgeschalteten Verfahrensprozesse insbesondere die Aufbereitung.

Unabhängig von den genannten Nachteilen ist es aufgrund der Gesundheitsgefährdung unumgänglich eine Bedüsung einzusetzen. Es gibt derzeit keine anderen technischen Lösungen, den anfallenden Staub unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte zu halten.

Daher müssen die negativen Auswirkungen durch das Versprühen einer Flüssigkeit durch eine Optimierung der Bedüsungseinrichtung minimiert werden. Hier müssen die im Folgenden beschriebenen Einflussfaktoren und auch die bisher nicht untersuchten Wechselwirkungen zwischen den Faktoren betrachtet werden. Erst die Betrachtung des Gesamtsystems Staubreduzierung durch Bedüsen wird geeignete Lösungswege aufzeigen, um die negativen Auswirkungen zu minimieren.

5.1 Düsentechnik

Düsen sind so konzipiert, dass sie unter den unterschiedlichsten Bedingungen eingesetzt werden können. Hieraus ergibt sich, dass häufig verschiedene Düsen für eine Problemlösung verwendet werden können. Man unterscheidet nach der Art der Energiezufuhr folgende Gruppen:

1. Einstoffdruckdüsen

Die für die Tropfenbildung notwendige Oberflächenenergie wird aus der kinetischen Energie der zu zerstäubenden Flüssigkeit gewonnen, die ihrerseits aus der zugeführten Druckenergie resultiert.

2. Zweistoffdüsen

Bei dieser Düsenbauart wird die benötigte Energie aus der kinetischen Energie eines Gases erzeugt.

3. Rotationszerstäuber

Durch rotierende Scheiben oder Becher wird der Flüssigkeit durch Fliehkraft Energie zugeführt, wodurch sich die Tropfen ausbilden.

4. Ultraschall-Zerstäuber

Bei diesen Düsen werden Schwingungen erzeugt, die Kapillarwellen bilden, aus denen bei hinreichend großer Schwingungsamplitude Tröpfchen herausgeschleudert werden.

5. Sonderzerstäubungsverfahren

Neben den genannten Verfahren gibt es auch Sonderverfahren, wie das elektrostatische Zerstäuben.

Einstoffdüsen lassen sich anhand ihres austretenden Flüssigkeitsstrahls in zwei Gruppen unterteilen, in strahlbildende Turbulenzdüsen und Lamellendüsen. Die Prinzipien der Tropfenbildung beider Arten wurden bereits im vorangegangenen Kapitel erläutert. Der wesentliche Unterschied liegt im jeweiligen Ort der Tropfenbildung. Während bei der Turbulenzdüse der austretende Flüssigkeitsstrahl unmittelbar hinter der Düse zerfällt, bilden sich bei der Lamellendüse zunächst Lamellen aus, die erst in einiger Entfernung vom Düsenaustritt zu Tropfen zerfallen.

5.1.1 Strahlbildende Einstoffdüsen

Strahlbildende Düsen (auch Turbulenzdüsen genannt) stellen die einfachste Form von Düsen dar. Sie haben eine runde Öffnung, aus der ein turbulenter Flüssigkeitsstrahl mit hoher Geschwindigkeit austritt. Die Geometrie der Düse beeinflusst sowohl den Volumenstrom als auch den Tropfendurchmesser. Mit Turbulenzdüsen

lassen sich verschiedene Strahlbilder erzeugen und somit dem jeweiligen Anwendungsfall anpassen. Man unterscheidet Vollkegelstrahl- und Vollstrahldüsen.

Vollstrahldüsen (VS) erzeugen bei hohen Betriebsdrücken einen stabilen, geschlossenen Vollstrahl mit definierter Strahllänge. Der glatte Vollstrahl kann als „Urstrahl“ der Düsenteknik bezeichnet werden. Im Grunde ist beim Vollstrahl eine Zerstäubung unerwünscht, da durch gebündelte Strahlen eine Maximierung der Strahlkraft angestrebt wird. Die Kunst des Düsenkonstruktors besteht hier darin, eine Strahlauflösung in Tropfen auch bei längeren Strahlen zu verhindern. Eingesetzt werden diese Düsen überall dort, wo es auf einen gezielten, punktförmig gebündelten, energiereichen Strahl ankommt, so zum Beispiel beim Schneiden, Trennen oder Reinigen [56, 8, 9, 10].



Abbildung 19: Schematische Darstellung einer Vollstrahldüse [8]

Vollkegelstrahldüsen (VKS) erzeugen einen gleichmäßigen Sprühkegel, wobei die Flüssigkeitsverteilung über die gesamte Kreisfläche des erzeugten Kegels verteilt wird. Die Größe der erzeugten Kreisfläche ist eine Funktion des Spritzwinkels.

Je nachdem, ob die Flüssigkeit in die bzw. senkrecht zu der eigentlichen Sprührich-

tung eingeleitet wird, unterscheidet man Axial- und Tangential-Vollkegeldüsen (Abbildung 20 bzw. Abbildung 21).

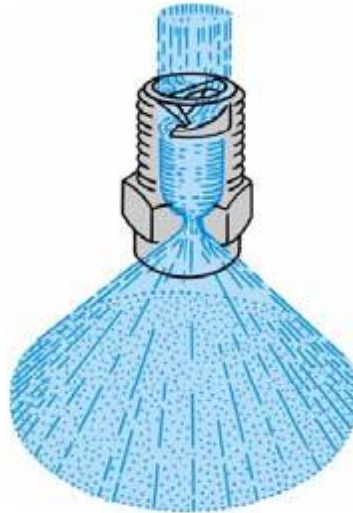


Abbildung 20: Axial-Vollkegeldüse /8/

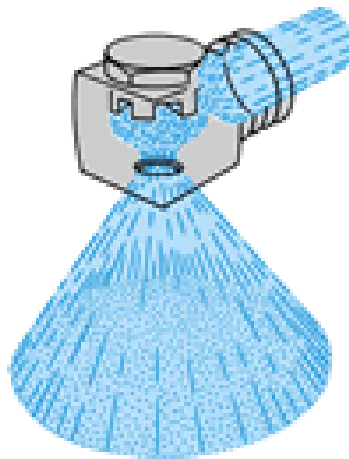


Abbildung 21: Tangential-Vollkegeldüse /8/

Axial-Düsen erzielen eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung über eine Kreisfläche durch einen Drallkörper, der in den freien Durchgangsquerschnitt eingesetzt ist. Die Dimensionierung und funktionale Abstimmung von Drallgebung und Drallmischkammer entscheiden über Strahlverlauf, Flüssigkeitsverteilung und Tropfenbildung. Turbulente Strömungen mit unterschiedlichen Tangential- und Axialgeschwindigkeitskomponenten führen zu einem insgesamt etwas größeren Tropfen-

spektrum als bei vergleichbaren Hohlkegeldüsen.

Bei Tangential-Vollkegeldüsen wird die Vollkegelstrahlform durch speziell abgestimmte Fräsungen im Düsenkörper erzielt. Die in Rotation versetzte Flüssigkeit erfährt eine definierte Ablenkung von der Strahlmitte. Dadurch entsteht eine äußerst gleichmäßige Flächenverteilung bei äußerst druckstabilem Spritzwinkel. Da diese Düsen ohne Dralleinsatz arbeiten sind sie besonders verstopfungsunempfindlich. Unabhängig von der Richtung der Flüssigkeitszufuhr lassen sich Spritzwinkel bis zu 120° realisieren /57, 8, 10, 11/.

5.1.2 Lamellenbildende Einstoffdüsen

Im Gegensatz zu dem mehr oder weniger frei austretenden Strahl einer Turbulenzdüse ist bei **lamellenbildenden Düsen** ein konstruktiver „Prallkörper“ in der Düse vorhanden, der den Flüssigkeitsstrom umlenkt. Dabei wird entweder der gebündelte Wasserfilm zu einem Flachstrahl oder einem Hohlkegel geformt. Danach lassen sich je nach Lamellenform Hohlkegel- und Flachstrahldüsen unterscheiden.

Wie bei den Vollkegeldüsen unterscheiden sich die Hohlkegeldüsen in der Richtung der Flüssigkeitszufuhr. Man unterscheidet Axial-Hohlkegeldüsen (Abbildung 22) und Excenter-Hohlkegeldüsen (Abbildung 23).



Abbildung 22: Axial-Hohlkegeldüse /8/



Abbildung 23: Excenter-Hohlkegeldüse /8/

Hohlkegeldüsen erzeugen den kleinsten, auf den Düsendurchmesser bezogenen, charakteristischen Tropfendurchmesser. Dabei werden bei der Axial-Hohlkegeldüse feinere Tropfenspektren erzeugt als bei der Excenter-Düse. Man erreicht aber bei der Axial-Düse nur einen Spritzwinkel von 90° und bei der Excenter-Düse einen von 130° . Da Excenter-Düsen wie auch Tangential-Vollkegeldüsen keine Einbauten, wie beispielsweise Drallkörper haben, sind sie nicht verstopfungsanfällig.

Lamellenbildende Flachstrahldüsen (FS) – auch Fächerstrahldüsen genannt - besitzen ein lineares Sprühbild (Abbildung 24).



Abbildung 24: Flachstrahldüse /8/

Durch entsprechende geometrische Gestaltung können Strahlbreite wie auch Sprühbild variiert werden. Erzielen lässt sich eine parabel-, trapez- oder rechteck-

förmige Flüssigkeitsverteilung. Besonders energiereiche Strahlen werden bei Spritzwinkeln bis 60° erzielt.

Charakteristisch für die Flachstrahldüse ist eine gleichmäßige Flüssigkeits- und Druckverteilung. Der Einsatz ist überall dort vorgesehen, wo ein kompakter, direkt auf das zu bedüsende Objekt richtbarer, gleichmäßig kontrollierter Bedüsungsstrahl benötigt wird.

5.2 Betriebsparameter von zerstäubten Flüssigkeiten

Zerstäubte Flüssigkeiten, auch als Spray bezeichnet, lassen sich durch die folgenden Betriebsparameter charakterisieren:

- 1 Volumenstrom
- 2 Spritzwinkel
- 3 Strahlkraft bzw. Strahldruck
- 4 Tropfengröße und Tropfenspektrum
- 5 Flüssigkeitsdruck
- 6 Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten

5.2.1 Betriebsparameter Volumenstrom

Der Volumenstrom bei einer reibungsfreien Flüssigkeitsströmung lässt sich für Einstoffdüsen anhand des Düsendurchmessers wie folgt ermitteln:

$$\dot{V} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

\dot{V}	= Volumenstrom	[m³/s]
d	= Durchmesser	[m]
Δp	= Druck	[N/m²]
ρ	= Dichte	[kg/m³]

Formel 3: Berechnung des Volumenstroms einer Turbulenzdüse

Anhand der Formel lässt sich erkennen, dass der Volumenstrom nicht nur vom Durchmesser sondern auch von der Dichte und dem Druck abhängt. Bei der Betrachtung eines Stoffes mit gleicher Dichte lässt sich somit eine druckbedingte und durch den Durchmesser variierende Veränderung des Volumenstroms erkennen.

5.2.2 Betriebsparameter Spritzwinkel

Die Ausbildung des Spritzwinkels ist durch den Aufbau der Düse bestimmt. Die konstruktive Abhängigkeit des Spritzwinkels bei lamellenbildenden Düsen wurde bereits beschrieben. Bei Einstoff-Turbolenzdüsen werden, sofern keine drallgebenden oder turbulenzsteigernden Einbauten vorhanden sind, nur kleine Spritzwinkel erreicht. Bei hohen Reynoldszahlen ist der Winkel u. a. abhängig von dem Verhältnis der Länge des Düsenkanals zum Bohrungsdurchmesser der Düse. Ist das Verhältnis L/d hinreichend groß, kommt es rasch zur Kavitation in der Düsenmündung. Der Flüssigkeitsstrom löst sich vorübergehend von der Wand des Düsenkanals und legt sich anschließend wieder an (Abbildung 25).

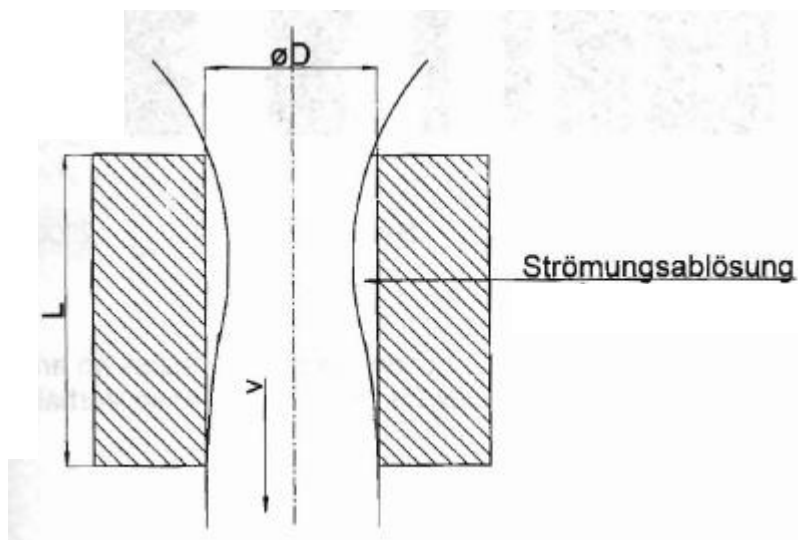


Abbildung 25: Kavitation bei einer Düse /43/

Die Kavitation reduziert bei reibungsbehafteten Düsen den Volumenstrom und führt zu einer Aufweitung des Flüssigkeitsstrahls. Dieses hat wiederum zur Folge, dass der Spritzwinkel Θ im Gegensatz zur nichtkavitativen Strömung breiter ist. Überschlägig lässt sich der Spritzwinkel nach folgender Formel ermitteln:

$$\tan \Theta \approx 0,13 \times \left(1 + \frac{\rho_G}{\rho} \right)$$

Θ	= Spritzwinkel	[°]
ρ_G	= Gasdichte	[kg/m³]
ρ	= Dichte	[kg/m³]

Formel 4: Spritzwinkel /43/

In der Praxis ändert sich beim Sprühen mit festem Spritzwinkel die resultierende Spritzbreite (-fläche) nicht linear mit der Entfernung. Auf den Spritzwinkel Θ wirken sich die umgebende Gasatmosphäre (Luft bzw. unter Tage die Wetter) und die Schwerkraft aus. Beide Faktoren verkleinern den theoretischen Spritzwinkel (Abbildung 26).

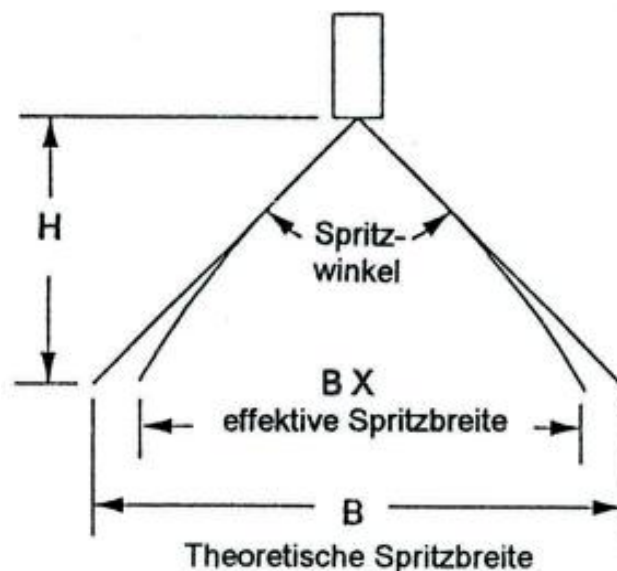


Abbildung 26: Zusammenhang zwischen effektiver und theoretischer Spritzbreite /10/

Neben den durch konstruktiven Aufbau hervorgerufenen Änderungen des Spritzwinkels wirken sich auch die Flüssigkeitseigenschaften bzw. Betriebsparameter auf das Spray aus. Bei sehr hohen Drücken vergrößert sich der Spritzwinkel und fällt seitlich weniger ab. Der Spritzwinkel ist normalerweise bei Verwendung einer Flüssigkeit mit höherer Viskosität als Wasser kleiner. Bei Flüssigkeit mit niedrigerer Oberflächenspannung als Wasser wird dagegen der Winkel größer.

Bei zunehmendem Sprühabstand sind die Angaben der Strahlbreite bzw. des Strahldurchmessers jedoch in Abhängigkeit vom Spritzabstand zweckmäßiger. Der Spritzwinkel einer Düse wird unmittelbar nach dem Düsenaustritt ermittelt. /43; 8/.

5.2.3 Betriebsparameter Strahlkraft

Die Strahlkraft, d. h. die Einwirkung eines Spritzstrahls auf eine Oberfläche, wird auf verschiedene Weise definiert. Für die Beurteilung von Düsen hat sich die Definition Strahldruck (Impact) [N/mm^2] als besonders aussagefähig erwiesen und allgemein durchgesetzt. Es handelt sich dabei um die Umrechnung der Gesamtstrahlkraft auf die beaufschlagte Fläche. Niedrige Strahldrücke erhält man beim Einsatz von Vollkegel- oder Weitwinkel-Flachstrahldüsen (120°). Flachstrahldüsen mit engeren Spritzwinkeln (15° - 60°) ergeben hohe Strahldrücke. Höchste Strahldrücke werden von Vollstrahldüsen erzeugt. Dieser Parameter ist für die Beurteilung bei einer Zertrennung oder Ablösung durch Düsen beispielsweise beim Hochdruckreinigen aussagekräftig. Bei der Reduzierung von Staub durch Bedüsung hat dieser Betriebsparameter daher eine untergeordnete Rolle und wird hier nicht weiter betrachtet.

5.2.4 Betriebsparameter Tropfengröße

Ein weiteres Charakterisierungsmerkmal einer zerstäubten Flüssigkeit ist das Tropfenspektrum. Bei Einstoff-Druckdüsen entsteht durch die aufgeprägte Flüssigkeitsturbulenz und die Wechselwirkung mit der Umgebungsluft ein Tropfenkollektiv, welches durch eine Tropfengrößenverteilung charakterisiert ist. Dabei ist es nicht möglich das Tropfenkollektiv zu berechnen und es müssen ähnlichkeitstheoretische Gesetzmäßigkeiten angewendet werden. Mittels dimensionsloser Kennzahlen und experimentell erzielter Messdaten müssen auf diesem Wege empirische Rechenvorschriften hergeleitet werden.

Zur Beurteilung des Tropfenspektrums werden sogenannte charakteristische Tropfendurchmesser angegeben. Häufig genutzt wird der Medianwert x_{50} . Ein Medianwert von beispielsweise $x_{50} = 100 \mu\text{m}$ bedeutet, dass 50% der Tropfen kleiner als $100 \mu\text{m}$ sind. Die Angabe eines einzigen charakteristischen Tropfendurchmessers,

hier des Medians, reicht aber nicht aus, das gesamte Tropfengrößenspektrum umfassend zu beschreiben. Identische Medianwerte sagen beispielsweise nichts über die spezifischen Oberflächen aus.

Daher gibt es verschiedene charakteristische Tropfendurchmesser, so den x_{10} - und x_{90} -Wert einer Tropfengrößenverteilung. Ähnlich wie der Median, geben diese Werte an, wie viel Prozent einer realen Tropfengrößenverteilung kleiner als der jeweils genannte Wert sind /43, 57/:

$x_{10}[\mu\text{m}]$: 10% der Tropfen (nach Volumen) sind kleiner als dieser Durchmesser

$x_{90}[\mu\text{m}]$: 90% der Tropfen (nach Volumen) sind kleiner als dieser Durchmesser

Am häufigsten, insbesondere für die Berechnung von Strömungs- und Wärmeübergangsprozessen, wird der Sauterdurchmesser x_{32} als Angabe verwendet. Würde man das gesamte Volumen der Tropfen eines zerstäubten Fluids in gleich große Kugeln umformen, deren gesamte Oberfläche gleich der gesamten Oberfläche der Tropfen ist, dann hätten diese Kügelchen den Sauterdurchmesser als Durchmesser. Berechnen lässt sich der Sauterdurchmesser wie folgt:

$$X_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} n_i \cdot x_i^3}{\sum_{i=1}^{i=N} n_i \cdot x_i^2}$$

X_{32}	= Sauterdurchmesser	$[\mu\text{m}]$
N	= Anzahl	$[-]$
x	= Durchmesser des i-ten Tropfens	$[\mu\text{m}]$

Formel 5: Sauterdurchmesser /43/

Tabelle 4 stellt den Sauterdurchmesser verschiedener Düsen bei unterschiedlichem Druck und Volumenstrom dar.

	Flüssigkeitsdruck p von Einstoff- Düsen					
	1 bar		2 bar		5 bar	
	V l/min	X ₃₂ µm	V l/min	X ₃₂ µm	V l/min.	X ₃₂ µm
Axial- Hohlkegel			0,1	140	0,17	100
			1	240	1,6	180
Excenter- Hohlkegel			1	320	1,6	240
	1,8	700	25	640	40	490
Vollkegel	0,7	540	1	400	1,6	300
	18	1300	25	1100	40	750
Bündeldüse	0,9	200	1,25	175	2	150
	20	400	28	265	44	190
Flachstrahl	0,7	400	1	360	1,6	300
	18	1200	25	1000	4,0	690

Tabelle 4: Sauterdurchmesser x_{32} und Volumenstrom bei verschiedenen Düsen /9/

5.2.5 Betriebsparameter Flüssigkeitsdruck

Bei den zuvor genannten Betriebsparametern wurde immer wieder auf den Flüssigkeitsdruck hingewiesen, da durch dessen Veränderung die anderen Parameter in jedem Fall beeinflusst werden. Der Flüssigkeitsdruck wirkt sich nur mittelbar über die bereits genannten Parameter durch Veränderung des Volumenstroms, der Tropfengröße etc. aus. Diese Zusammenhänge sind in Tabelle 5 nochmals dargestellt.

		Zunahme des Flüssigkeitsdrucks
Betriebsparameter	Volumenstrom	ansteigend
	Spritzwinkel	eher ansteigend
	Tropfengröße	abnehmend
	Geschwindigkeit	ansteigend
	Aufprallkraft	ansteigend

Tabelle 5: Beeinflussung der Betriebsparameter durch den Flüssigkeitsdruck /9/

Der Flüssigkeitsdruck wird aus diesem Grund in verschiedenen Untersuchungen als Basiswert angesehen und die Ergebnisse auf diesen Parameter bezogen.

5.2.6 Betriebsparameter Stoffeigenschaften

Als Fluid wird für die Bedüsung Brauchwasser, Wasser aus der Kühlleitung und teilweise Motorkühlwasser von den Gewinnungsgeräten eingesetzt. Die Zusammensetzung variiert je nach Betriebs- und Abbaubedingung, daher können keine eindeutigen Stoffdaten vorausgesetzt werden. Als Anhaltswerte sind in den folgenden Tabellen die physikalischen Stoffdaten von reinem Wasser dargestellt.

T [°C]	Spezifisches Vol. V [cm³/g]		Dichte ρ [g/cm³]	
	Eis	flüssiges Wasser	Eis	flüssiges Wasser
-20	1,086960	1,006580	0,920000	0,994390
0	1,090510	1,000160	0,917899	0,999868
4		1,000028		0,999972
20		1,001797		0,998234
40		1,007842		0,992247
60		1,017089		0,983226
80		1,029027		0,971819
100		1,043453		0,958382

Tabelle 6: Spezifisches Volumen und Dichte von Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen /21/

Temperatur T [°C]	Oberflächenspannung σ [10^{-5} Pa·s]	dynamische Viskosität η [10^{-3} Pa·s]	Kompressibilität κ [10^{-4} hPa ⁻¹]
0	75,6	1,78	51,0
5	74,9	1,52	49,6
10	74,2	1,31	45,9
15	73,5	1,40	44,2
20	72,8	1,00	44,5
25	72,0	0,89	46,1
30	71,2	0,80	48,9
50	67,9	0,55	44,0
100	58,9	0,28	47,7

Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften des Wassers in Abhängigkeit zu der Temperatur/21/

Das Bedüsungswasser wird durch Filtern vorbereitet, wodurch gewährleistet wird, dass im Wasser keine Schwebeteilchen größer als 50 µm vorhanden sind /11/. Die Temperaturen schwanken zwischen 8 °C (Kühlwasserkreislauf) und der durchschnittlichen Umgebungstemperatur im Abbauggebiet unter Tage (max. 28 °C Effektivtemperatur). Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel maximal 20°C warmes Wasser verwendet wird.

Wie der Flüssigkeitsdruck wirken sich auch die Stoffeigenschaften nur mittelbar auf die Staubbildung über verschiedene Betriebsparameter aus (Tabelle 8).

		Stoffeigenschaften		
		Zunahme der Viskosität	Zunahme der Flüssigkeitstemperatur	Zunahme der Oberflächenspannung
Betriebsparameter	Volumenstrom	*	**	kein Effekt
	Spritzwinkel	abnehmend	ansteigend	abnehmend
	Tropfengröße	ansteigend	abnehmend	ansteigend
	Geschwindigkeit	abnehmend	ansteigend	vernachlässigbar
	Aufprallkraft	abnehmend	ansteigend	vernachlässigbar

* Bei Vollkegel- und Hohlkegeldüsen ansteigend bei Flachstrahl-Düsen abnehmend

** Abhängig von der Spritzflüssigkeit und dem Düsentyp

Tabelle 8: Beeinflussung der Betriebsparameter durch Stoffeigenschaften /9/

Die Veränderung der Oberflächeneigenschaften durch Zusatzmittel wird noch gesondert in Kapitel 5.4 betrachtet.

5.3 Äußere Einflussfaktoren

Sprays werden nicht nur durch ihre Betriebsparameter charakterisiert, sondern auch durch auf sie einwirkende äußere Einflüsse. Im Wesentlichen sind das die Umgebungstemperatur und die Luftgeschwindigkeit.

Die Temperatur eines Fluids wirkt sich zum einen direkt auf die Staubbindeeeigenschaften aus (vgl. Kapitel 4.2). Zum anderen kommt es durch die Erwärmung des Fluids zu einer erhöhten Verdunstungsrate.

Durch die Verdunstung verringert sich die absolute Anzahl von Tropfen. Unter Wärmequellen sollen hier die Umgebungstemperatur, die Gebirgstemperatur und im erweiterten Sinne auch die Wärme des Fluids am Ort der Staubbindung betrachtet werden.

Die Luftgeschwindigkeit bewirkt, dass insbesondere die feinen Tropfen von der eigentlichen Flugbahn abdriften. Zwar werden die Staubkörner auch durch hohe Luftgeschwindigkeiten mitgerissen, aber durch die unterschiedlichen Gewichtsverteilungen sind die Flugbahnen variabel und dadurch sinkt die Auftreffwahrscheinlichkeit.

Die gemessene Wettergeschwindigkeit in einem Streb stellt einen gewichteten Mittelwert dar, denn die Wettergeschwindigkeiten sind u. a. aufgrund der wechselnden Querschnitte nicht gleichmäßig verteilt. Die höchsten Geschwindigkeiten sind im Bereich des Kohlenstoßes anzutreffen, da hier der größte freie Querschnitt vorliegt (Abbildung 27) /34/.

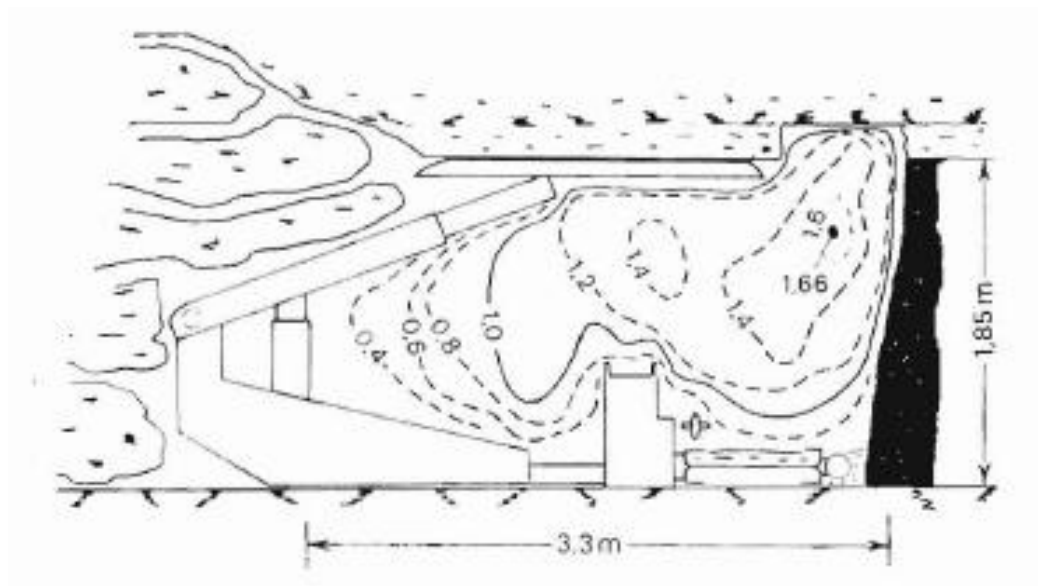


Abbildung 27: Geschwindigkeitsprofil bei einer mittleren Geschwindigkeit von 2,1 m/s /34/

5.4 Zusatzstoffe

Im Folgenden sollen für die Vollständigkeit der Betrachtung der Einflussfaktoren die Zusatzstoffe beschrieben werden. Deren Beurteilung ist aber nur begrenzt Bestandteil dieser Arbeit.

Durch den Einsatz von Tensiden lassen sich die Staubbindeigenschaften und damit auch das Bedüsungsergebnis – wie in Kapitel 4.2 beschrieben – verändern. Tenside (von lateinisch *tensus* „gespannt“) sind Substanzen, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit herabsetzen.

Bei Tensiden handelt es sich um organische Moleküle, die sich im gelösten Zustand an der Phasengrenzfläche konzentrieren. Es sind grenzflächenaktive Substanzen, die aus einem hydrophoben Kohlenwasserstoffrest und einer hydrophilen Stoffgruppe (Carboxylat-, Sulfonat-, Ammonium- oder Hydroxylgruppe) bestehen (Abbildung 28).

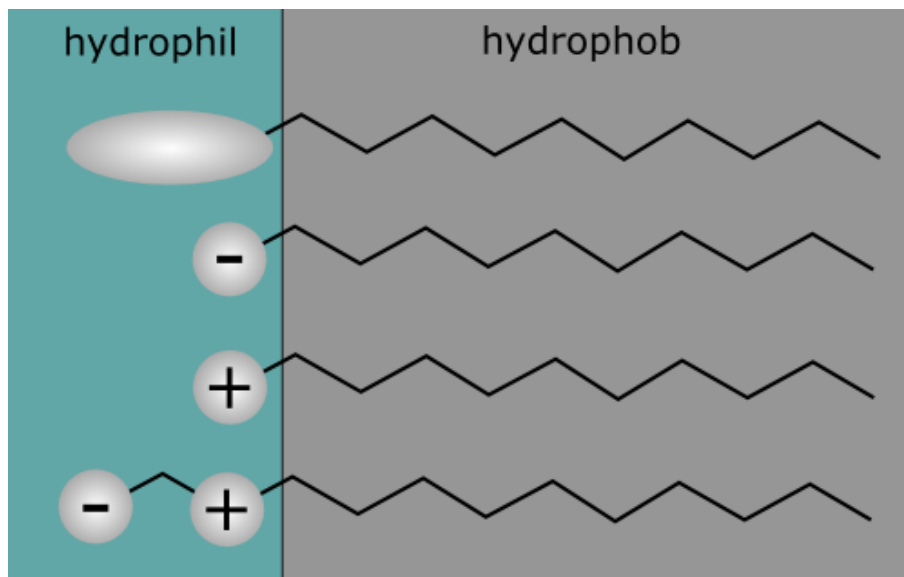


Abbildung 28: Grundstruktur von Tensiden

Als Folge dieser Struktur bilden Tenside in Wasser keine molekulardispersen Lösungen, sondern lagern sich zu kugelförmigen Gebilden (Micellen) zusammen, deren hydrophobe Reste nach innen orientiert sind, während die hydrophilen, polaren Gruppen mit dem Wasser Kontakt haben (Abbildung 29).

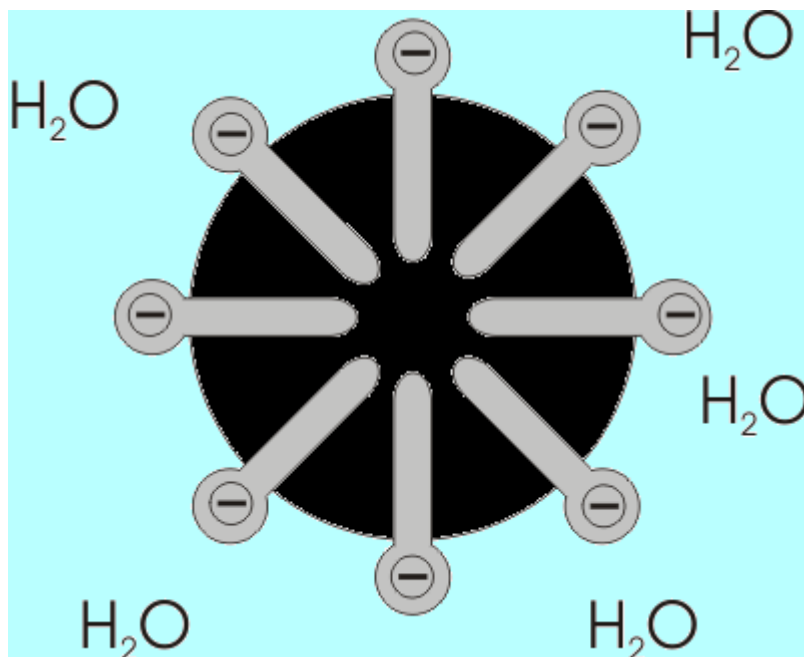


Abbildung 29: Tensid in Wasser

Man unterscheidet zwischen anionaktiven, kationaktiven und nichtionogenen Tensiden und Amphotensiden. Anionaktive Tenside haben ein grenzflächenwirksames Anion. Vertreter dieser Gruppe sind u. a. organische Natriumsalze, Seifen, Sulfonate und Fettalkoholsulfate. Die kationaktiven Tenside sind sogenannte totalsubstituierte Ammonium-Salze mit einem längerkettigen Alkylrest als Substituent. Als nichtionogene Tenside bezeichnet man Tenside, die frei von Ionen sind. Die Amphotensiden sind Moleküle, die sowohl eine negativ geladene als auch eine positiv geladene Gruppe enthalten /49/.

Im Steinkohlenbergbau wird als Tensid das Produkt Contradust Spray der Firma CFT Compactfiltertechnik GmbH, Gladbeck, eingesetzt. Es besteht aus einer Mischung verschiedener Tenside (u. a. Fettalkoholsulfat und Alkylbenzolsulfonat), wobei anionaktive Verbindungen den Hauptteil stellen /5/. Dieses Tensid ist auf den Kohlenstaub spezialisiert.

6 Bedüsungseinrichtungen im Gewinnungsbereich

Die Bedüsung im Gewinnungsbereich hat grundsätzlich zwei Aufgaben: Sie soll den anfallenden Staub binden und heiße Oberflächen (Meißel) abkühlen, um eine etwaige Zündung explosibler Methanmischungen zu vermeiden. Je nach Gewinnungsart lassen sich die Bedüsung der schälenden und die der schneidenden Gewinnung unterscheiden.

6.1 Bedüsungseinrichtungen bei der schälenden Gewinnung

Im Bereich der schälenden Gewinnung muss der Staub in der Hobelgasse mit der sogenannten Kappenspitzenbedüsung bekämpft werden, da durch diese Lösetechnik der Staub nicht nur am Werkzeug entsteht. Beim Abschälen der Kohle werden größere Gesteinsbrocken gelöst, die sich durch den Aufprall auf den Panzerförderer unter Staubbildung zerkleinern. Somit entsteht eine großflächige Staubwolke, die mit den Wettern durch den Streb zieht. Eine Bedüsung am Hobelkörper selbst ist technisch nicht umsetzbar (Abbildung 30).

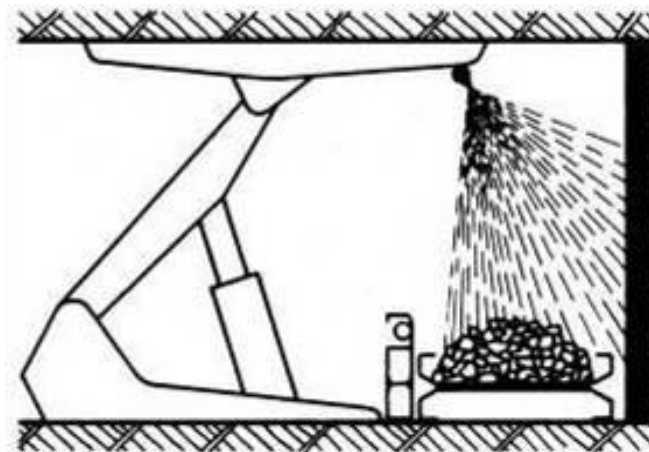


Abbildung 30: Hobelgassenbedüsung /42/

Zur Reduzierung der versprühten Wassermenge, werden die Düsen in Abhängigkeit vom Hobelstandort gesteuert. Dabei wird jeweils eine bestimmte Anzahl von Düsen vor und hinter dem Gewinnungsgerät mit Wasser beaufschlagt. Maximal werden

dabei die Düsen an drei Schilden aktiviert. Damit ist gewährleistet, dass an jedem Punkt im Streb vergleichbare Bedüsungssituationen vorliegen. Neben der Befeuchtung des Abbaustoßes durch die Kappendachbedüsung werden noch das Hangende und der Bruchraum bedüst (Abbildung 31).

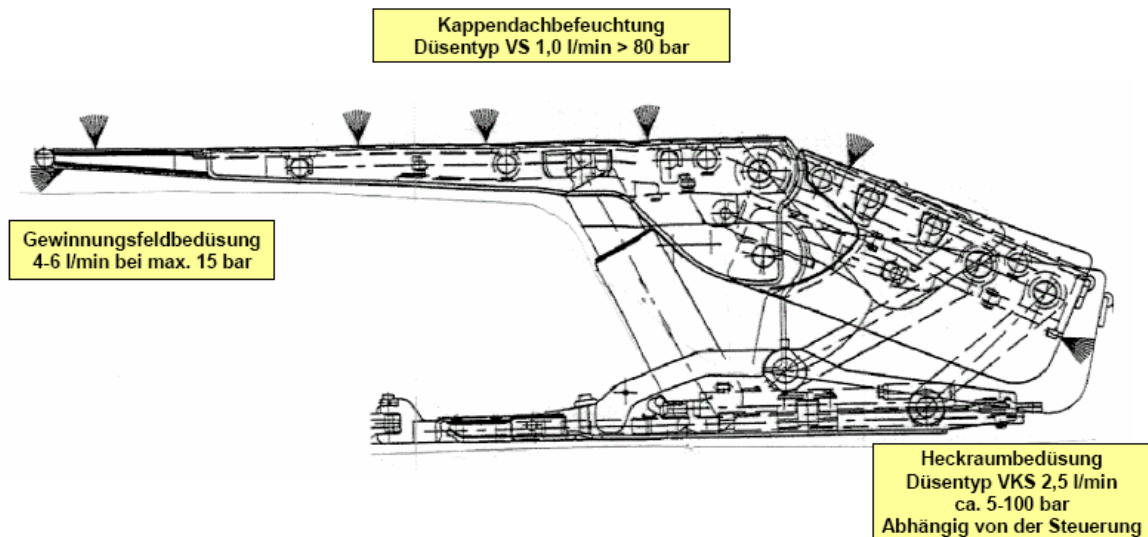


Abbildung 31: Düseneinrichtungen an einem Ausbauschild /11/

Während bei der Kappendachbefeuchtung Vollstrahldüsen mit einem Nennvolumenstrom von 1 l/min eingesetzt werden, setzt man bei der Hobelgassen- und Heckraumbedüsung axiale Vollkegelstrahldüsen (VKS) ein (Abbildung 32).



Abbildung 32: Vollkegelstrahldüse der Firma Lechler, Metzingen, für die Hobelgassenbedüsung

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass möglichst große Düsendurchmesser und damit hohe Wasservolumenströme verwendet werden sollen. Je größer der Durchmesser desto gröber ist das Tropfenspektrum, dies steht im Widerspruch zu der Theorie der Staubbinding (vgl. Kapitel 4.2). Allgemein binden kleinere Tropfen den Staub besser, aber bei der Hobelgassenbedüsung werden die feineren Tropfen durch den senkrecht zur Sprühhichtung wirkenden Wetterstrom erfasst und stehen somit für die Staubbinding nicht zur Verfügung.

Neben dem Durchmesser wird die Tropfengröße auch durch den Spritzwinkel beeinflusst. Je größer der Spritzwinkel desto größer ist das Tropfenspektrum [31, 11/].

Um ein optimales Sprühergebnis zu erreichen, sind die Düsen an den Kappenspitzen im 45 ° Winkel zum Kappendach angeordnet. Der Volumenstrom variiert zwischen 4 und 6 l/min bei einem Wasserdruck zwischen 5 und 15 bar.

6.2 Bedüsungseinrichtungen bei der schneidenden Gewinnung

Bei der schneidenden Gewinnung können die Bedüsungseinrichtungen an der Walze angebracht werden (Abbildung 33). Dies hat den Vorteil, dass der Staub am Entstehungsort gebunden und nicht durch die Wetter aufgenommen werden kann. Weiterhin werden die Meißel gekühlt und dadurch die Gefahr einer Zündung von explosiblen Mischungen reduziert.



Abbildung 33: Walzenbedüsung /11/

Es haben sich hier zwei unterschiedliche Verfahren durchgesetzt, die sogenannte Ejektorbedüsung und die Hochdruckschneidspurbedüsung. Die Ejektorbedüsung, arbeitet im Niederdruckbereich zwischen 30 und 70 bar Wasserdruck. Die Ejektorkanäle im Meißelhalter ziehen staubhaltige Umgebungsluft an und das Gemisch aus Staub und Wasser wird zusammen versprüht (Abbildung 34).



Abbildung 34: Meißelhalter und Meißel bei der Ejektorbedüsung

Als Düsen werden Vollkegelstrahldüsen mit einem Spritzwinkel von 35° bis 40° eingesetzt (Abbildung 35).



Abbildung 35: Düsen der Ejektorbedüsung

Die Hochdruckschneidspurbedüsung ist darauf ausgelegt, die Schneidspuren der Schneidwerkzeuge zu befeuchten (Abbildung 36).



Abbildung 36: Meißelhalter und Meißel der Hochdruckschneidspurbedüsung

Die verwendeten Düsen haben einen Durchmesser von 0,6 mm und sind hinter dem Meißel so angeordnet, dass sie die Schneidspur bedüsen. Bei dieser Düsenanordnung wird reines Wasser mit Vollkegelstrahldüsen versprüht (Abbildung 37).



Abbildung 37: Düsen mit 0,6 mm Durchmesser der Hochdruckschneidspurbedüsung

In Tabelle 9 werden alle Anwendungsgebiete der Bedüsung in einem Gewinnungsbetrieb und die dabei verwendete Technik zusammenfassend dargestellt.

Anwendungsbereich	Vorgang/Anordnung	Düsentyp	Volumenstrom (l/min)	Druckbereich (bar)	Sprühwinkel (°)
Schneidende Gewinnung	Schneidspurbedüsung	VS	1,1-1,3	100	0
	Ejektorbedüsung Walzenbegleitende Bed.	VKS VKS/FS	1,2-1,7 2,5-6,0	30 5-15	40 60-120
Schälende Gewinnung	Kappenspitze	VKS/FS	2,5-6,0	5-15	60-120
Schreitausbau	Kappendachbefeuchtung	VS	1,1-1,3	80-120	0
	Bruchschild Heckraum	VS	1,1-1,3	80-120	0
		VKS	2,5	80-120	90
Förderung	Übergaben	VKS	2,5-4,0	5-15	60-90
	Brecher	VKS/FS	2,5-6,0	5-15	60-90
	Kipp-/Ladestellen	VKS/FS	2,5-4,0	5-15	60-120

Tabelle 9: Zusammenfassung der verwendeten Bedüsungstechnik /11/

7 Darstellung der Ergebnisse von Referenzversuchen

Im folgenden Abschnitt sollen die wesentlichen Untersuchungen zu Staubreduzierungssystemen sowie deren Ergebnisse im Bereich der schneidenden und schälenden Gewinnung angegeben werden. Wie bereits definiert (vgl. Kapitel 2) werden diese Versuche im Folgenden als Referenzversuche bezeichnet.

7.1 Untersuchungen zur Walzenbedüsung

Im Silikosebericht 19 aus dem Jahr 1997 /39/ werden die Ergebnisse zu unterschiedlichen Düsenanordnungen bei der schneidenden Gewinnung dargestellt. Durch eine entsprechende Anordnung der Wasserkanäle wurde eine Bedüsung vor, durch und hinter dem Meißel in einem Gewinnungsbetrieb untersucht (Abbildung 38).

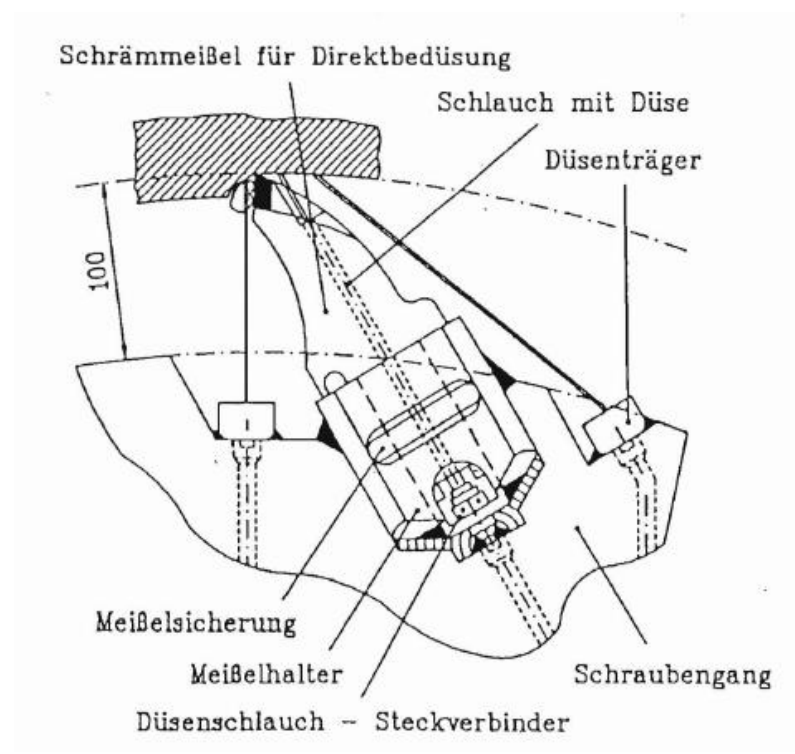


Abbildung 38: Anordnung der Düsen an einem nachgebauten Meißel /39/

Die Anordnung der Düsen vor dem Meißel zeigte mit zunehmendem Druck eine Zunahme der Staubmenge. Die Variante mit der Bedüsung durch den Meißel zeigte zwar mit zunehmendem Druck eine Verringerung des Staubanteils, bei 130 bar ergab sich jedoch eine Vergrößerung des Staubanteils. Die Erhöhung lag vermutlich an technischen Mängeln. So wurde diese Düsenanordnung aus technischen Gründen (geringe Standzeit der Meißel, Wartungsfreundlichkeit etc.) nicht weiter verfolgt.

Die Anordnung der Düsen hinter dem Meißel, zeigte wie bei der Bedüsung durch den Meißel mit zunehmendem Druck eine Abnahme der Staubmenge. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass hierbei nicht nur die Schneidspur bedüst wurde, sondern auch die sich öffnenden Risse und Klüfte. So wurde festgestellt, dass bei hohem Druck die Durchfeuchtung bis zu 2 m in den Kohlenstoß vorseilt (Abbildung 39).

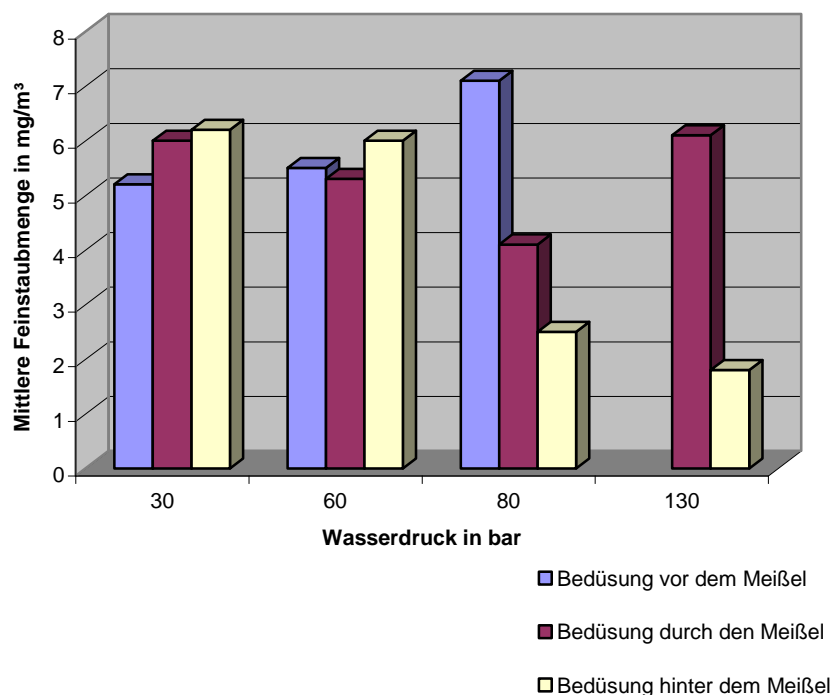


Abbildung 39: Mittlere Feinstaubmenge in Abhängigkeit zum Wasserdruck /39/

Die guten Ergebnisse führten dazu, dass das Hochdruckbedüsungssystem in weiteren Versuchsreihen untersucht wurde. Ziel war es, dabei die Bedüsung hinsichtlich der Staubreduzierung zu optimieren. Die Untersuchungen erfolgten an einem

künstlichen Kohlenstoß und in Betriebsversuchen unter Tage. Bei diesen Versuchen wurde die Verringerung der Staubmenge mit zunehmendem Bedüsungswasserdruck bis zu einem Wasserdruck von 600 bar ermittelt. Als Bedüsungssystem kam die Schneidspurbedüsung zum Einsatz (Abbildung 40).

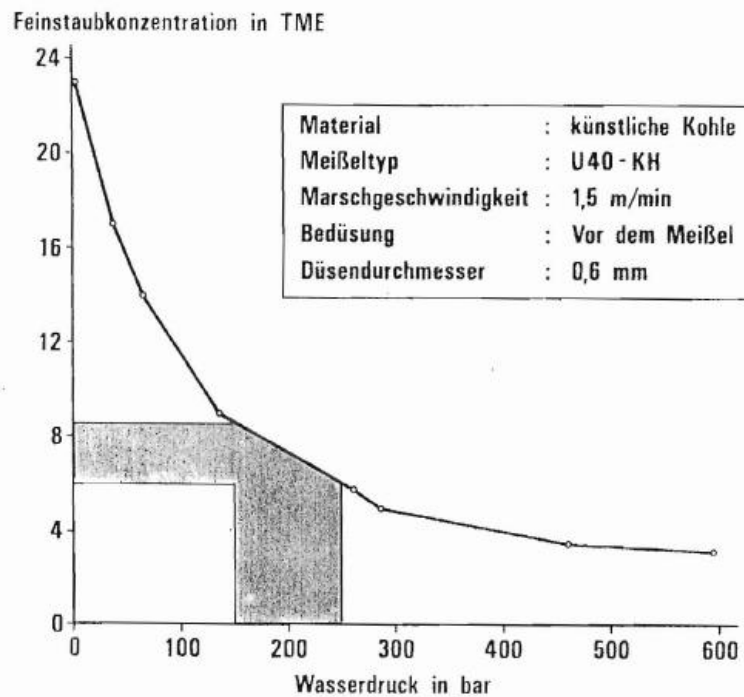


Abbildung 40: Feinstaubkonzentration am Walzenlader in Abhängigkeit zum Wasserdruck /27/

Die Feinstaubbelastung wurde in TME, Technische Maßeinheit, angegeben. Dieser Wert kann unter Berücksichtigung eines haufwerksspezifischen Umrechnungsfaktors in absolute Werte umgerechnet werden. Von 0 bis 110 bar nimmt die Feinstaubkonzentration zunächst stark ab, danach kommt es zu einer weiteren, aber schwächeren Abnahme. Ab 450 bar bleibt die Staubkonzentration annähernd konstant.

Um die Ursachen für die bessere Staubbindung zu untersuchen, wurden die Tropfengröße und -geschwindigkeit mit einem Phasen-Doppler-Anemometer ermittelt. Dabei zeigte sich, dass eine Verfeinerung des Tropfenspektrums bzw. eine Erhöhung der absoluten Anzahl an Wassertropfen bei diesen Düsen nur bis zu einem Druck von 110 bar auftritt (Abbildung 41).

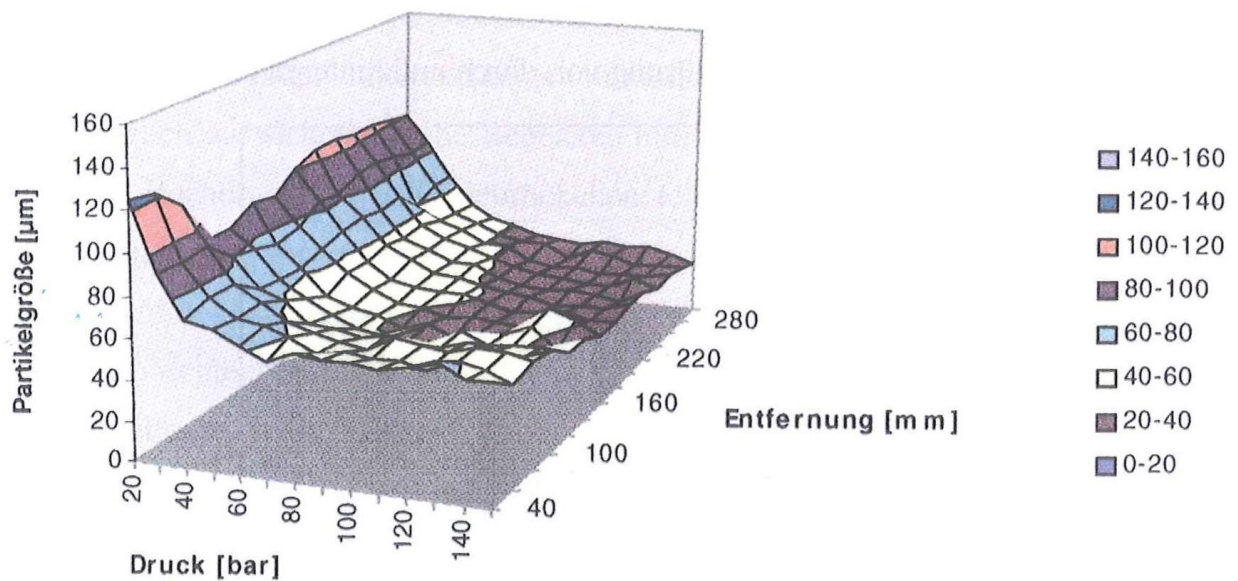


Abbildung 41: Partikelgröße in Abhängigkeit zu Druck und Entfernung /27/

Ab einem Wert von 110 bar nimmt nur noch die Geschwindigkeit der Tropfen zu. Die – wenn auch geringere – Abnahme der Staubkonzentration ist durch die höhere Auftreffwahrscheinlichkeit zu erklären. Der Erfolg der Staubreduzierung wird daher im Wesentlichen von der absoluten Anzahl an Wassertropfen bestimmt. Aus wirtschaftlichen und ergonomischen Gesichtspunkten ist damit eine Grenze bei 100 bar anzusetzen (Abbildung 42).

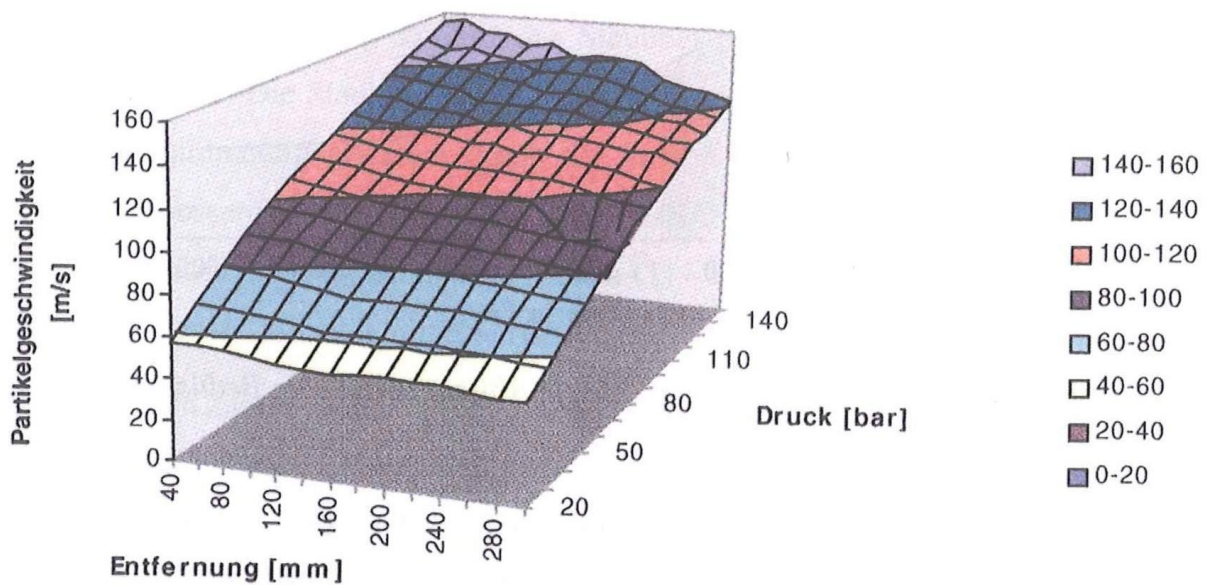


Abbildung 42: Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit zu Druck und Entfernung /27/

Wie bereits erwähnt, dient das Bedüsungswasser nicht nur der Staubbinding, sondern auch der Kühlung. Die Meißel, insbesondere die Schneidflächen werden beim Schneiden aufgeheizt. Dabei können Meißeltemperaturen bis über 400 °C und in den Schneidspuren Temperaturen bis ca. 1000 °C entstehen /27, 40, 55/.

Neben der Hochdruckschneidspurbedüsung ist das zweite bei der Deutschen Steinkohle eingesetzte Bedüsungssystem das Ejektorsystem. Auch bei diesem System wurden die Tropfengeschwindigkeit und -größe bestimmt. Die Messungen wurden bei geöffneten und teilweise bewusst verschlossenen Ejektorbohrungen durchgeführt. Durch diese Maßnahme wurde ein mögliches Verstopfen der Öffnungen simuliert. Bei bis zu 2 geschlossenen Ansaugöffnungen ist ein außermittiges Geschwindigkeitsmaximum bei 21 m/s zu erkennen. Zu den Rändern hin fällt dieses Maximum auf einen Wert von bis zu 12 m/s ab. Sind mehr Öffnungen verschlossen, so ist kein Maximum mehr erkennbar, sondern nur ein gleichmäßiger Geschwindigkeitsabfall (Abbildung 43).

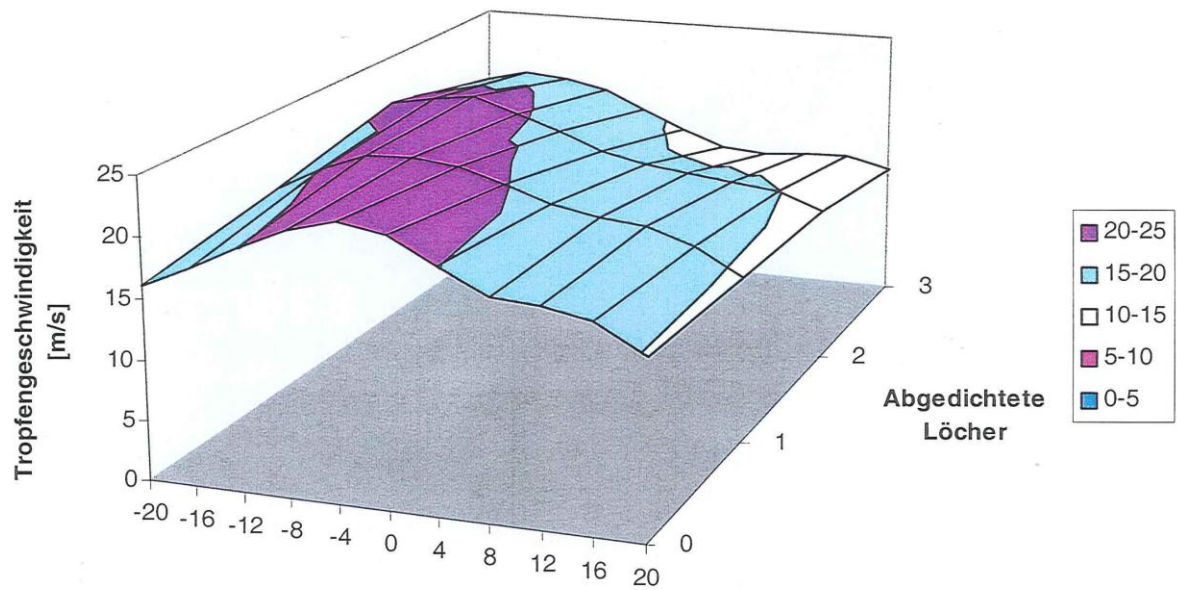


Abbildung 43: Tropfengeschwindigkeit bei einer Vollstrahldüse mit Ejektorbedüsung in Abhängigkeit zur Anzahl der abgedichteten Löcher /27/

Die Tropfengrößenverteilung ist vergleichbar mit der der Hochdruckschneidspurbedüsung. Allerdings sind die mittleren Tropfendurchmesser im Kernbereich mit $100\text{ }\mu\text{m}$ doppelt so groß wie bei den Düsen mit dem Hochdruckschneidspursystem. Im Randbereich erhöht sich die mittlere Tropfengröße auf $160\text{ }\mu\text{m}$ (Abbildung 44).

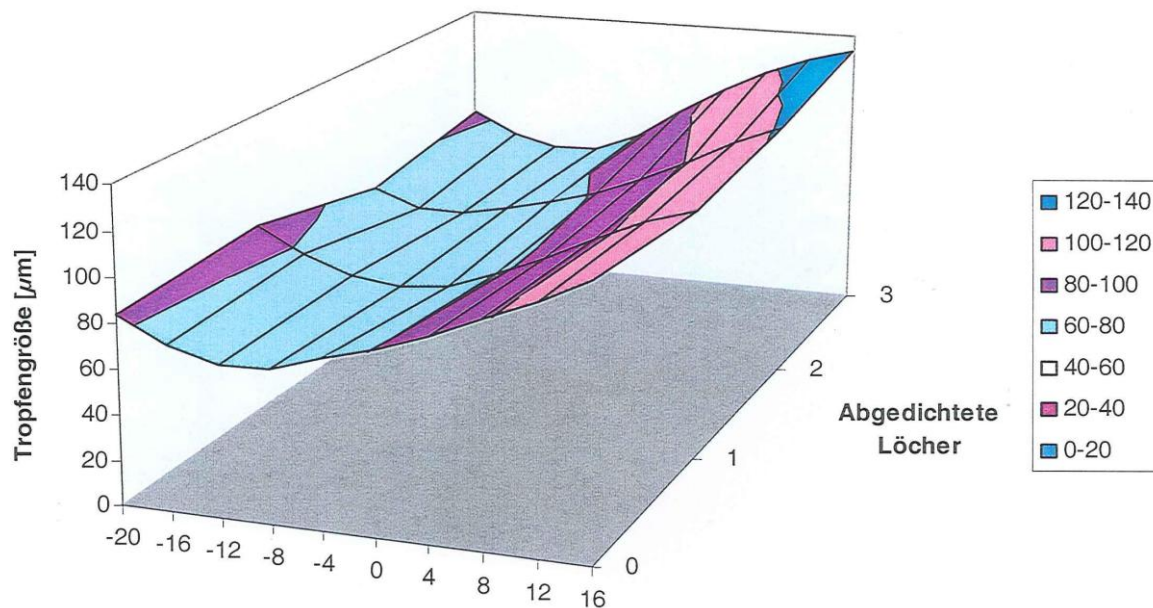


Abbildung 44: Tropfengröße bei einer Vollstrahldüse mit Ejektorbedüsung in Abhängigkeit zur Anzahl der abgedichteten Löcher /27/

Beim Ejektorsystem ist somit - bei gleicher Wassermenge - die für die Staubbinding zur Verfügung stehende absolute Anzahl an Wassertropfen geringer. Weiterhin ist bei diesem System anzumerken, dass sich die Verschiebung des Düsenstrahls aus der Mitte auf die Staubbindingefähigkeit auswirkt. Technisch angedacht ist, dass der Sprühstrahl den Meißelrücken und damit den Ort der Staubentstehung benetzt. Bei verstopften Ansaugdüsen ist zu erwarten, dass sich die Feinstaubentwicklung erhöht.

Um die Staubreduzierung in ihrer Effektivität zu untersuchen, wurden Versuche mit den jeweiligen Systemen im Staubbekämpfung-Versuchsfeld der DMT durchgeführt. Dazu wurden die Meißelhalter an der Decke eines Staubkanals mit einem Querschnitt von 1,5 m² aufgehängt. Die Messungen hinsichtlich des Staubgehalts wurden mit einem tyndallometrischen Messinstrument durchgeführt. Sowohl für die Hochdruckschneidspurbedüsung als auch für das Ejektorsystem zeigte sich eine annähernd lineare Abhängigkeit von der Feinstaubzusammensetzung. Mit zunehmendem Druck nimmt die Feinstaubkonzentration ab (Tabelle 10).

	Hochdruckschneidspurbedüsung				Ejektorbedüsung		
Wasserdruck	0 bar	15 bar	35 bar	80 bar	0 bar	15 bar	35 bar
Schieferstaub	9,78 = 100%	8,25 =84,4%	6,99 =71,5 %	5,59 =57,2%	9,78 =100 %	6,30 =64,4%	6,26 =64,0%
Steinkohlenstaub	11,29 =100%	8,43 =74,7%	8,16 =72,3%	7,47 =66,2%	11,29 =100%	10,13 =89,7%	8,72 =77,2%
Schieferstaub + 20 % Quarzstaub	8,21 =100%	7,18 =87,5%	6,82 =83,1%	6,24 =76%	8,21 =100%	6,49 =79,0%	5,85 =71,3%

Tabelle 10: Ergebnisse der tyndallometrischen Staubbemessung beim System Hochdruckschneidspur- und Ejektorbedüsung mit unterschiedlichen Staubarten und bei unterschiedlichen Wasserdrücken /27/

Vom Ergebnis her zeigt sich also, dass beide Systeme in Bezug auf ihren Einsatzbereich als gleichwertig zu betrachten sind.

Hinsichtlich der Auswirkungen von Wärmequellen bei der schneidenden Gewinnung wurden von Henke /27/ theoretische Betrachtungen angestellt. Sie ergaben, dass durch die Verdunstung lediglich jeder vierte Tropfen für die Staubreduzierung zur Verfügung steht. Die Temperaturen der Schneidflächen am Gestein sind abhängig von der Gesteinsart; die zugrunde gelegten Höchsttemperaturen treten in erster Linie bei quarzhaltigem Gestein auf. Die theoretischen Ergebnisse nach Henke wurden durch untertägige Messungen bestätigt. Bei diesen Versuchen zeigte sich auch, dass beim Schneiden von Nebengestein (hoher Quarzanteil) eine 4-fach höhere Feinstaubkonzentration entsteht /27/.

Daher muss insbesondere in quarzhaltigen Gesteinspartien ein besonderes Augenmerk auf die verdüστε Wassermenge gelegt werden. Eine Optimierung von Bedüsungssystemen muss die Veränderung der Tropfen berücksichtigen, da die absolute Anzahl an Tropfen entscheidend für die Staubbinding ist. Im Folgenden wird das Tröpfchenspektrum, das diese Veränderung beinhaltet, als effektives

Tröpfchenspektrum bezeichnet.

Als Alternativen für die bestehende Walzenbedüsung wurden Wasser-Luft-Düsen untersucht. Zur Ermittlung der Wirksamkeit dieser Düsen erfolgten Untersuchungen zum Aufbau des Sprühkegels wiederum mit einem Phasen-Doppler-Anemometer /27/. Der Wasserdruck betrug bei diesen Versuchen 1 bar und der Luftdruck wurde auf 1, 1.3 und 1.6 bar eingestellt. Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass sich im Zentrum des Sprühstrahls weitaus höhere Tröpfchengeschwindigkeiten als am Rand einstellen. Die Geschwindigkeit der Tropfen nimmt mit dem Druck der Druckluft zu (Abbildung 45).

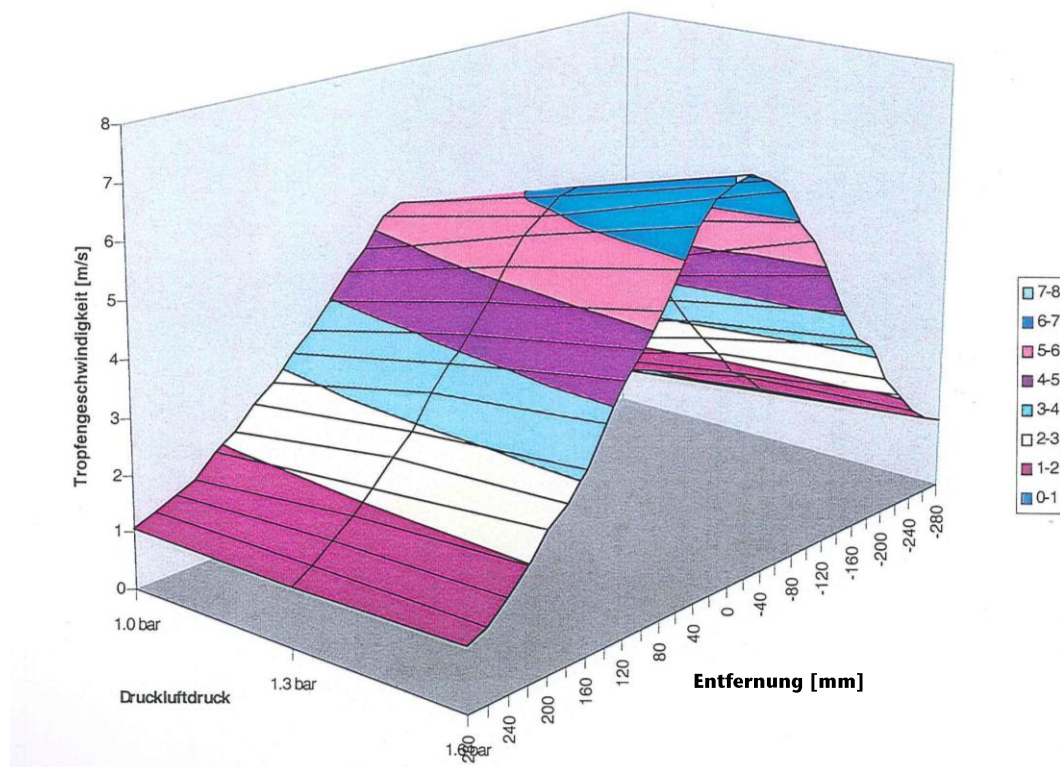


Abbildung 45: Tropfengeschwindigkeit bei einer Vollstrahldüse in Abhängigkeit zu Druckluftbedarf und Entfernung /27/

Der Sauterdurchmesser variierte im Zentrum des Sprühstrahls; mit zunehmendem Druck der Druckluft der Düse verringerte sich der Tropfendurchmesser. Im Randbereich dagegen blieb der Sauterdurchmesser annähernd konstant. Das bedeutet, dass sich mit zunehmendem Luftdruck der Düse der Sauterdurchmesser über den gesam-

ten Sprühkegel vergleichmäßig (Abbildung 46).

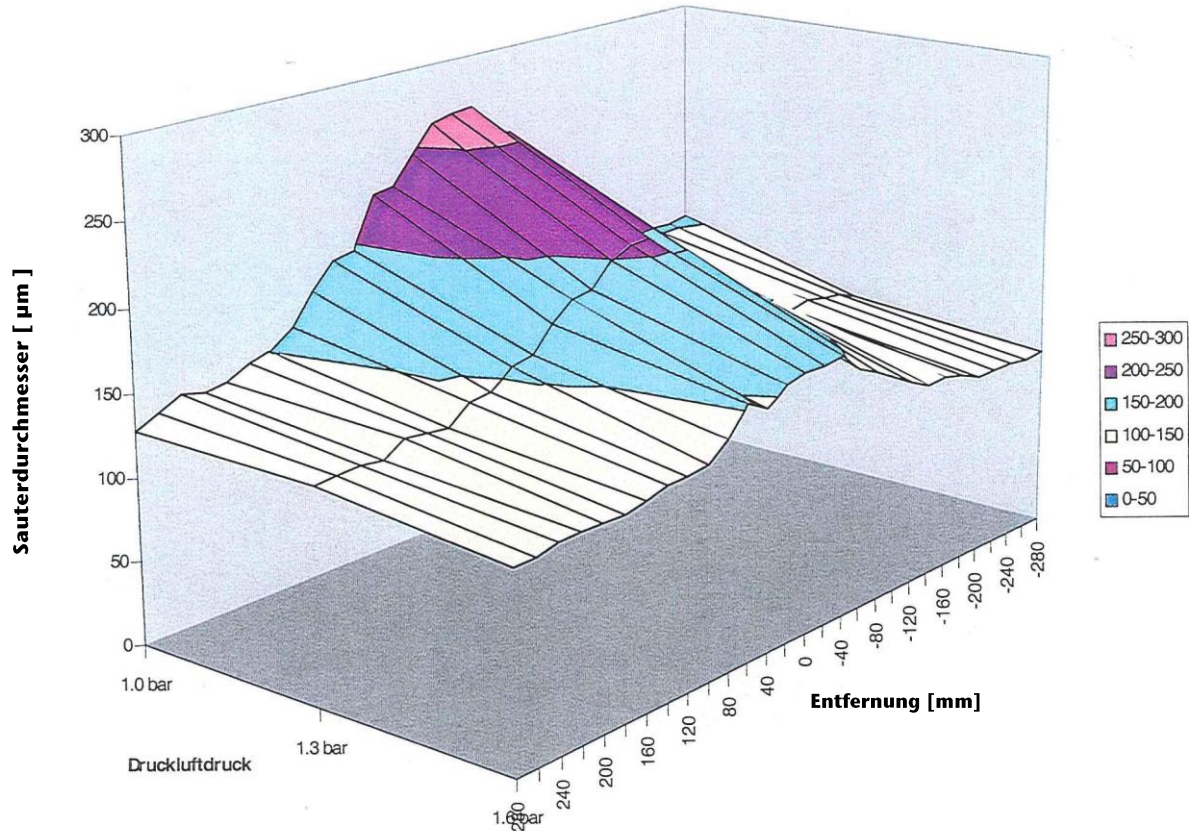


Abbildung 46: Mittlere Tropfengeschwindigkeit bei einer Vollstrahldüse /27/

Insgesamt sind die Tropfengrößen von Wasser-Luft-Düsen sehr gering, so dass sie leicht durch Luftströmungen quer zur Sprührichtung abgelenkt werden können. Nach Henke u. a. ist ein Einsatz bei der Bedüsung im Gewinnungsfeld aufgrund der hohen Wettergeschwindigkeiten nicht geeignet. Einsatzmöglichkeiten bieten sich nur in Bereichen mit geringer Wetterbewegung (abgeschlossene Bandübergaben, Vortriebe mit Sonderbewetterung etc.).

7.2 Untersuchung zur Hobelgassenbedüsung

Die Hobelgassenbedüsung stellt das klassische Bedüsungssystem für den Bereich der schälenden Gewinnung dar. In der Vergangenheit haben umfangreiche Untersuchungen zu der heute eingesetzten Technik der mitlaufenden Bedüsung geführt. Dabei wird vor und hinter dem Hobel eine definierte Anzahl von Düsen eingeschaltet. Durch diese Bedüsungsart wird gewährleistet, dass an jedem Punkt im Streb eine vergleichbare Bedüsungssituation erreicht wird.

Staubtechnische Untersuchungen wurden in einem Abbaubetrieb durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand dabei in erster Linie die Ermittlung der Staubkonzentration am Streb-Strecken-Übergang. Die Erkenntnisse lassen sich aufgrund der Düsenstellung - rechtwinklig zu der Wetterrichtung nach Henke /Henke/ - auf die Situation bei der Hobelgassenbedüsung übertragen. Untersucht wurden Vollkegelstrahldüsen mit 60 Grad Spritzwinkel bei einem Wasserdruck von 60 bzw. 15 bar. Die Wettergeschwindigkeit in diesem Bereich betrug bis zu 6 m/s, wodurch es zu einer unzureichenden Haufwerksbenetzung kam, da ein Teil des Bedüsungswassers vernebelt und strebabwärts befördert wurde.

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Staubmessungen. In der ersten Versuchsreihe wurden Vollkegelstrahldüsen (VKE 2,5 60°) mit einem Nennvolumen von 2,5 l/min eingesetzt, für die zweite Messreihe wurden hingegen Düsen mit größerem Durchmesser und einem Nennvolumenstrom von 4 l/min (VKE 4 60°) verwendet. Um für beide Düsen einen Gesamtwasserstrom von 11 l/min einzustellen, wurde der Bedüsungswasserdruck entsprechend reduziert.

Tag der Messung	Bedüsungsparameter		Düsentyp	Feinstaubkonzentration		Δc [mg/m ³]
	Druck	Volumenstr.		Streb	Brecher	
22.7.1997	60 bar	11 l/min	VKE 2,5 60°	2,2 mg/m ³	3,1 mg/m ³	0,9
23.7.1997	60 bar	11 l/min	VKE 2,5 60°	2,6 mg/m ³	3,9 mg/m ³	1,3
Mittelwert						1,1
24.7.1997	15 bar	11 l/min	VKE 4,0 60°	2,7 mg/m ³	3,3 mg/m ³	0,6
25.7.1997	15 bar	11 l/min	VKE 4,0 60°	1,6 mg/m ³	2,1 mg/m ³	0,5
Mittelwert						0,55

Tabelle 11: Feinstaubkonzentration im Streb und am Brecher mit unterschiedlichen Bedüsungsparametern /30/

Die Messergebnisse zeigen, dass mit der Reduzierung des Wasserdrucks eine Verringerung der Staubreduzierung einhergeht. Dies ist auf das gröbere Tropfenspektrum der zweiten Vollkegelstrahldüse zurückzuführen. Je größer das Spektrum ist, umso stabiler ist der Sprühstrahl und umso weniger wird er durch äußere Einflüsse abgelenkt.

Um das Tropfenspektrum beurteilen zu können, wurden wiederum im Staubbekämpfung-Versuchsfeld der DMT Tröpfchengrößen-Analysen vorgenommen. Dabei wurden neben Düsen mit 60 Grad Spritzwinkel auch solche mit 90 Grad verwendet, wie sie bei der Kappendachbedüsung eingesetzt werden. Hinsichtlich des Nennvolumenstroms wurden jeweils eine mit 2,5 l/min und eine mit 4 l/min verwendet. Bei den Untersuchungen wurde jeweils ein Wasservolumenstrom von 5,5 l/min eingestellt. Abbildung 47 zeigt als Ergebnis der Untersuchung die jeweiligen Sauterdurchmesser.

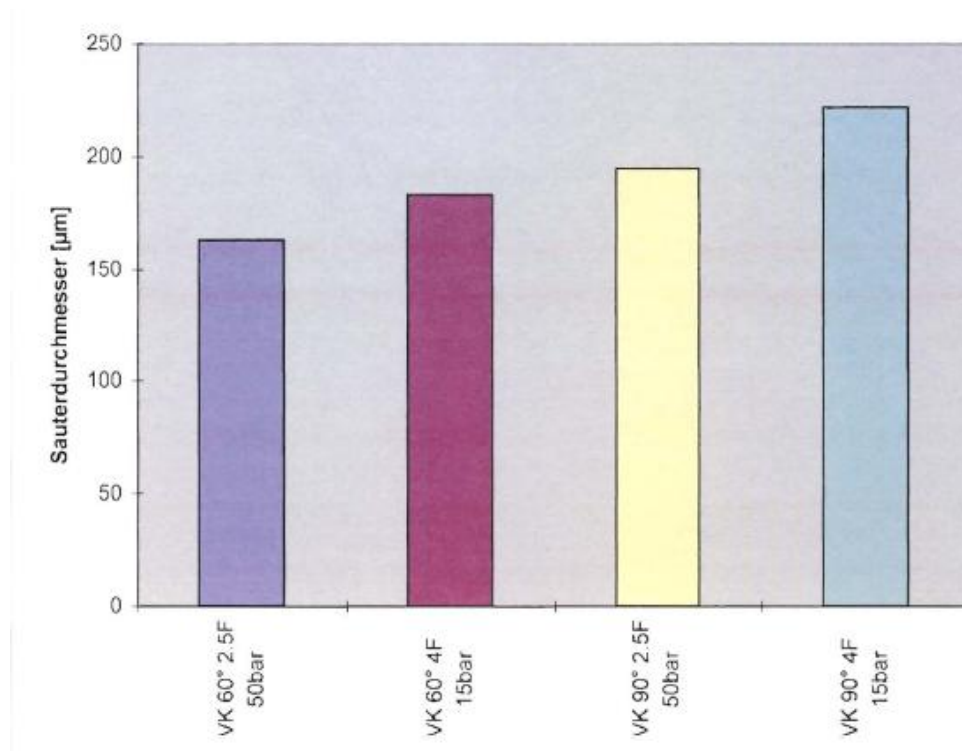


Abbildung 47: Sauterdurchmesser bei unterschiedlichen Vollkegelstrahldüsen /31/

Die Vollkegelstrahldüse (VK 60° 2,5F) mit einem Nennvolumen von 2,5 l/min und einem Spritzwinkel von 60°C hat den geringsten Sauterdurchmesser. Im Vergleich zu den Düsen mit 60 Grad Spritzwinkel, haben die 90 Grad Düsen mit 4 l/min Nennvolumenstrom einen noch größeren Sauterdurchmesser und damit einen stabileren Sprühstrahl, der nicht so leicht von Luftströmungen abgelenkt wird. Mit den Ergebnissen aus den Feldversuchen (vgl. Tabelle 11), zieht Henke das Fazit, dass die Vollkegelstrahldüsen VK 90 4F am effektivsten für die Staubbinding in der Hobelgasse sind.

Mit Einsatz einer mitlaufenden Bedüsung wurde ein erster Optimierungsschritt hinsichtlich der versprühten Wassermenge vorgenommen. Eine weitere Reduzierung lässt sich durch eine fördermengenabhängige Bedüsung vornehmen. Dadurch wird gewährleistet, dass das Fördergut immer gleichmäßig befeuchtet ist, und dass es zu keiner Unterbefeuchtung oder Übernässung kommt. Entsprechende Versuche wurden am Hobelversuchsstand der DMT durchgeführt.

7.3 Äußere Einflussfaktoren und Tenside

Die bisherigen Untersuchungen basierten im Wesentlichen auf den Einflussfaktoren Düsentechnik und Betriebsparameter und konnten dem jeweiligen Anwendungsfall (schneidende Gewinnung etc.) zugeordnet werden. Im Folgenden werden noch Untersuchungen der äußeren Einflussfaktoren und der Zusatzstoffe dargestellt.

In Hinblick auf die Ablenkung von Tropfen durch den Wetterstrom wurden Untersuchungen an den 90 Grad Vollkegelstrahldüsen der schälenden Gewinnung durchgeführt. Es zeigte sich, dass der mittlere Durchmesser des Tropfenkollektivs mit zunehmender Wettergeschwindigkeit größer wird. Die feineren Tropfen werden wetterstromabwärts transportiert, entsprechend werden die gemessenen mittleren Tropfendurchmesser (Partikelgröße) mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt (Messpunkt 1) immer kleiner (Abbildung 48 und Abbildung 49).

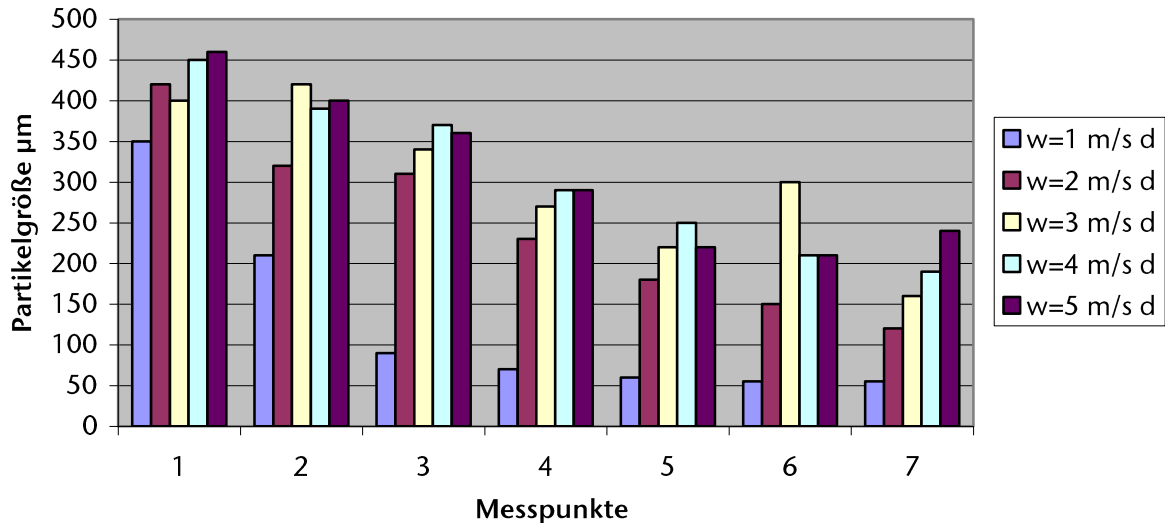


Abbildung 48: Verteilung der Partikelgrößen in Abhängigkeit von der Wettergeschwindigkeit bei 2 bar Wasserdruck/19/

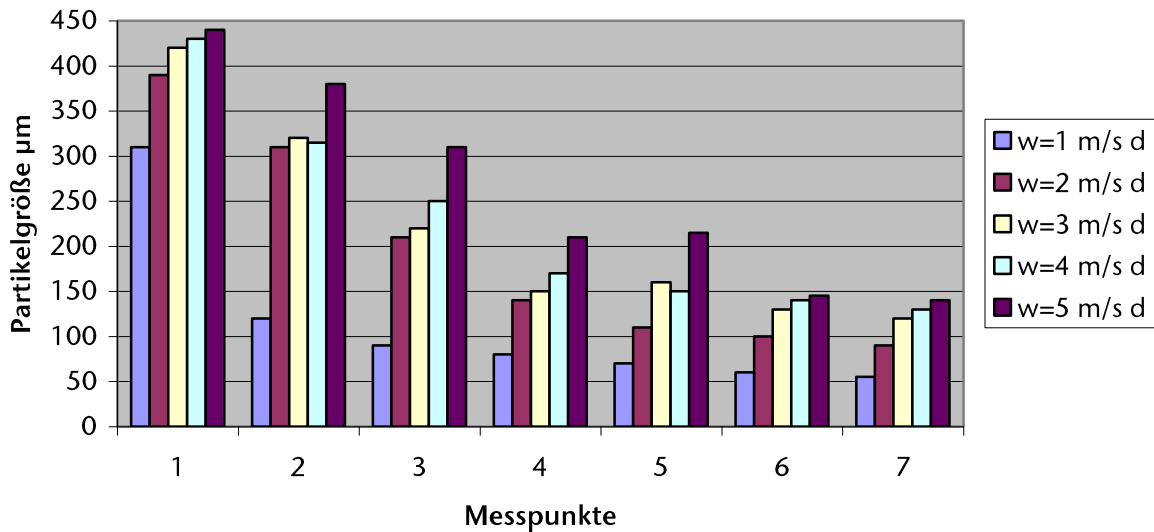


Abbildung 49: Verteilung der Partikelgrößen in Abhängigkeit von der Wettergeschwindigkeit bei 5 bar Wasserdruck/19/

Weitere äußere Einflussfaktoren stellen Wärmequellen dar, die je nach Intensität Verdunstungen hervorrufen. Es wurde bereits dargelegt, dass theoretisch nur jeder vierte Tropfen des Bedüsungsfluids bei der schälenden Gewinnung für Staubbindung und der übrige Teil für die Kühlung der Werkzeuge (vgl. Kapitel 7.1) zur Verfügung steht.

In Untersuchungen zur Auswirkung der Wärme des versprühten Fluids hat sich gezeigt, dass wärmeres Wasser den Staub schlechter bindet. Verdunstet man Wasser mit einer so niedrigen Temperatur, dass der Taupunkt unterschritten wird, so wird dem Wetter Wasser entzogen und es findet eine Abkühlung statt. Es entstehen sogenannte diffusiophoretische Kräfte, die durch diffundierende Gase hervorgerufen werden. Diese bewirken, dass Staubteilchen an die Wassertropfen transportiert werden.

Neben allgemeinen Untersuchungen zu Tensiden wurde als Zusatzmittel das Produkt OSB Dustcon bei einem untertägigen Einsatz auf dessen Wirksamkeit untersucht. Dabei handelt es sich um ein biologisch abbaubares Zusatzmittel auf organischer Zitrusbasis. Es wurde festgestellt, dass das Tensid zu einer Vergrößerung der

Tropfen bei Vollkegelstrahldüsen führt. Henke führt diesen Fakt darauf zurück, dass durch die herabgesetzte Oberflächenspannung der einzelne Abreißvorgang, der zur Tropfenbildung führt, in seiner Intensität verlangsamt wird, so dass sich im Mittel größere Tropfen bilden. Trotz der größeren Tropfen ließ sich eine verbesserte Staubbindefähigkeit im Staubbekämpfungs-Versuchsfeld nachweisen, da der Strahl durch den fehlenden Feinanteil stabiler ist (vgl. auch Kapitel 7.2). Auch Untersuchungen unter Tage bestätigten diese Erkenntnis. Bei der Hobelgassenbedüsung ergab sich eine Verringerung der Staubkonzentration von 20 %. Auch eine Verringerung der im Einsatz befindlichen Düsen und damit der Bedüsungswassermenge um 30 % reduzierte das Ergebnis immerhin noch um 10 % /30/.

8 Ergebnis der Referenzversuche

Das eigentliche Ziel der beschriebenen Referenzversuche war stets die Minimierung der Staubmenge. Eine Optimierung fand fast ausschließlich im Hinblick auf die Düsentechnik (inklusive der Anordnung) und die unmittelbar beeinflussbaren Betriebsparameter wie Wasserdruck und Wassertemperatur statt. Auch wurden in Ansätzen die Umgebungsbedingungen betrachtet, so beim klimatisierten Staubkanal die Umgebungstemperatur oder die theoretischen Betrachtungen der Verdunstung von Wassertropfen in temperierter Umgebung. Allgemein lassen sich für die Bedüsungen der Gewinnungseinrichtungen folgende Ergebnisse/Erkenntnisse festhalten.

1. schälende Gewinnung

- Anwendung der mitlaufenden Hobelgassenbedüsung
- es ist ein stabiler Düsenstrahl notwendig, der nicht so leicht von der umströmenden Luft abgelenkt wird
- der Nennvolumenstrom der Düse sollte bei 4 l/min liegen und der Spritzwinkel bei 90°

2. schneidenden Gewinnung

- Bedüsung hinter dem Meißel sinnvoller als vor oder durch den Meißel
- Hochdruckschneidspurbedüsung bei 80 bis 100 bar am effektivsten
- Ejektorbedüsungssystem bei 30 bis 70 bar am effektivsten
- beide Systeme vergleichbar in ihrer Wirkung
- Bedüsungswasser dient auch der Abkühlung der Meißel, wodurch das für die Staubbinding zur Verfügung stehende Wasser reduziert wird
- temperiertes Wasser bindet Staub schlechter als Wasser, bei dem durch die Temperaturdifferenz zwischen Fluid und umgebender Luft der Taupunkt unterschritten wird

In der folgenden Tabelle sind diese Versuchsziele und die dazugehörigen Versuchsaufbauten zusammenfassend noch einmal dargestellt.

	Versuchsaufbau	Art der Versuche	Versuchziele und Ergebnisse
1	Klimatisierter Staubkanal	Staubmessung	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Wirksamkeit unterschiedlicher Wassertemperaturen bei konstanten Lufttemperaturen - kühleres Wasser ist effektiver als wärmeres Wasser (bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur)
2	Schrämwalzenversuchsstand	Staubmessung bei der schneidenden Gewinnung	<ul style="list-style-type: none"> - Untersuchungen zur Staubentwicklung am Walzenlader - Betrachtung des Zerspanungsvorgangs - Untersuchung des Meißelverschleißes - Düsen hinter dem Meißel sind bei der Hochdruckwasserbedüsung optimal
3	In-Situ	Staubmessung bei unterschiedlicher Düsenanordnung	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der optimalen Position der Düsen - zusätzliche Durchfeuchtung des anstehenden Gebirges - Düsen hinter dem Meißel sind bei der Hochdruckwasserbedüsung optimal
4	Strömungskanal des Staubbekämpfungsversuchsfelds	Tropfenanalysen	<ul style="list-style-type: none"> - Tropfenverteilung und Geschwindigkeit im Sprühkegel - Abhängigkeit von Druck und Entfernung von der Düse auf die Tropfenverteilung - mit zunehmendem Druck sinkt die Tropfengröße und die Geschwindigkeit steigt an
5	Strömungskanal des Staubbekämpfungsversuchsfelds	Tropfenanalysen und Staubmessung	<ul style="list-style-type: none"> - Untersuchung des Einflusses der Düsenanordnung und des Wasserdrucks auf die Feinstaubentwicklung - Untersuchung des Bohrungsdurchmessers im Hinblick auf Verstopfungsgefahr - je größer die Düsenöffnung desto geringer ist die potentielle Verstopfung der Düsenöffnung - der Durchmesser muss mindestens größer als 0,5 mm sein - Düsen hinter dem Meißel sind bei der Hochdruckwasserbedüsung optimal - bis 100 bar reduziert sich die Staubmenge deutlich, korrespondierend zu der sinkenden Tropfengröße - danach verringert sich die Tropfengröße und Staubreduzierung - ab 100 bar wird die Staubbildung im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit und damit die Auftreffwahrscheinlichkeit beeinflusst

Tabelle 12: Übersicht über die Versuche

6	In-Situ	Staubmessung aufbauend auf Untersuchungen nach 2	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung des optimalen Bedüsungswasserdrucks zwischen 80 und 110 bar
7	In-Situ & Strömungskanal des Staubbekämpfungs-Versuchsfeld	Staubuntersuchung Tropfenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der optimalen Bedüsungseinrichtung für den Streb-Strecken-Übergang respektive der Hobelgassenbedüsung - Bessere Staubreduzierung wird mit größerem Bohrungsdurchmesser erreicht - Das Ergebnis zeigt, dass mit zunehmendem Spritzwinkel und größerem Bohrungsdurchmesser, die Staubmenge reduziert wird.
8	In-Situ-Überprüfung	Tröpfchenanalyse	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung des Tropfenspektrums mit Zusatzmittel - Im Gegensatz zu Vollkegelstrahldüsen kommt es ausschließlich bei Vollstrahldüsen zu einer Verfeinerung des Sprühbilds
		Staubuntersuchung	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Staubreduzierung mit und ohne Tensid - Staubbindung mit Tensid Dustcon verringert die gemessene Staubmenge um ca. 10% Reduzierung
		Staubuntersuchung	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Staubreduzierung mit und ohne Tensid - Verringerung der Feinstaubkonzentration in der Luft um 20%
9	Strömungskanal des Staubbekämpfungs-Versuchsfelds	Staubuntersuchungen für die schneidende Gewinnung Untersuchung der Zündgefahr	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der Zündgefahr und der Auswirkung der entstehenden Wärme auf das Bedüsungssystem - Untersuchung der Hochdruckwasser- und der Ejektor-Bedüsung - beide Systeme in unterschiedlichen Bereichen effektiv - jeder vierte Wassertropfen steht für die Staubreduzierung zur Verfügung

Tabelle 12 (Fortsetzung): Übersicht über die Versuche

Die bisherigen Versuche haben den aktuellen Stand der Bedüsungseinrichtung optimiert. Bisher wurde jedoch das Gesamtsystem Staubreduzierung noch nicht betrachtet. So ist zwar bekannt, dass sich beispielsweise die Betriebsparameter untereinander beeinflussen, allerdings wurde dies nicht in Zusammenhang mit den anderen Einflussfaktoren offen betrachtet.

Es muss daher untersucht werden inwieweit sich das Gesamtsystem Staubreduzierung abbilden lässt. Letztendlich lassen sich daraus unterschiedliche Optimierungsansätze entwickeln, durch die sich eine Bedüsung leichter an die gegebenen Anforderungen anpassen kann.

9 Abbildung des Gesamtsystems Staubreduzierung durch Bedüsung in einem Windkanal

9.1 Grundlegender Aufbau

Entsprechend der Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens sollte eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Staubentstehung und Bedüsung dargestellt werden. Hierbei muss ein Kompromiss geschaffen werden, da sich beispielsweise die Größenverhältnisse nicht umsetzen lassen.

In der DIN 13284-1 "Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen" werden keine Mindestquerschnitte und -längen für eine Messung festgelegt. Aus strömungstechnischen Gesichtspunkten sollte jedoch eine möglichst lange Strecke zur Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeiten der angesaugten Luftmenge vorhanden sein.

Im Hinblick auf etwaige Störquellen (Krümmer o. ä.) sollte vor der Staubentnahme eine ausreichende Beruhigungsstrecke vorhanden sein. Eine genaue Festlegung der Länge dieser Zone ist nicht gegeben. In der Praxis geht man jedoch davon aus, dass mindestens eine Entfernung vom 5-fachen des Kanaldurchmessers vorhanden sein muss.

Wie in den Kapiteln 7 und 8 dargestellt, gab es im Wesentlichen drei Versuchsstände mit den folgenden Querschnitten:

1. Klimatisierter Staubkanal	0,12 m ²
2. Strömungskanal des Staubbekämpfungs-Versuchsfelds	1,50 m ²
3. Schrämwälzenversuchsstand	6,90 m ²

Unter Berücksichtigung der aus der Praxis angenommenen Mindestberuhigungszone ist der Querschnitt des Schrämwälzenversuchsstands nicht umsetzbar. So bedeutet ein Querschnitt kleiner als 1 m² beispielsweise, dass Einbauten - wie Messgeräte -

große Strömungsbarrieren darstellen. Der Strömungsquerschnitt würde durch ein Tyndallometer (Querschnitt ca. 0,03 m²) um bis zu 30 % reduziert (Abbildung 50).

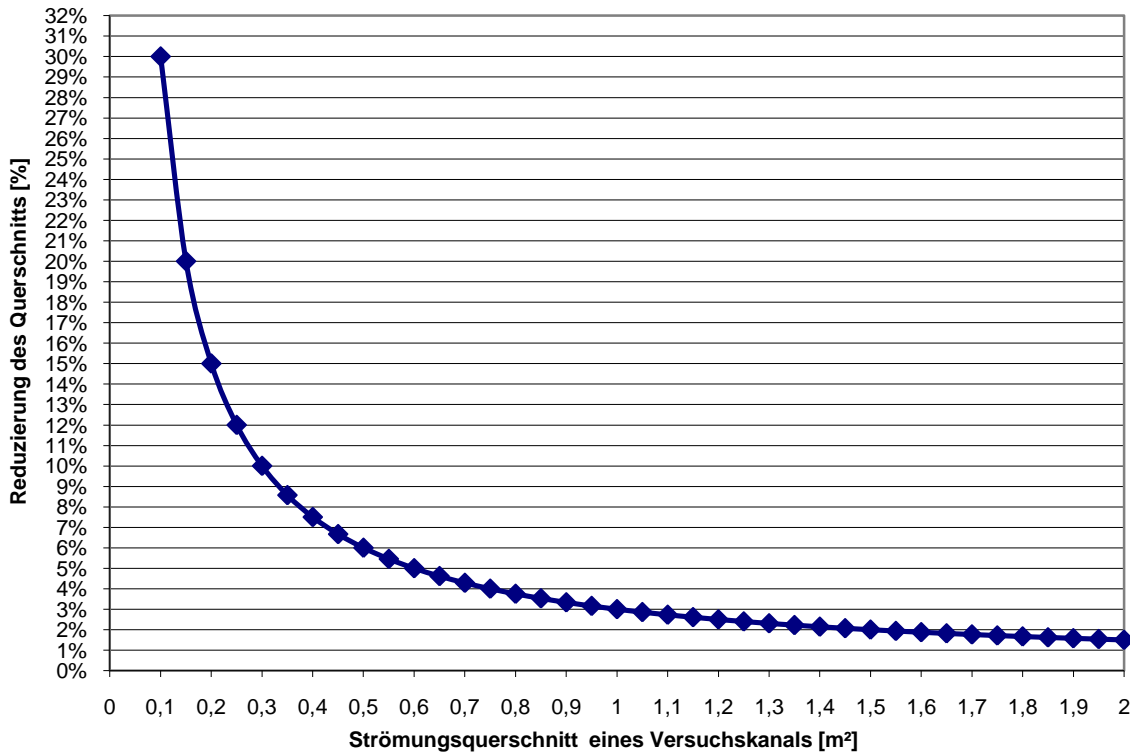


Abbildung 50: Reduzierung des Strömungsquerschnitts durch ein Tyndallometer in Bezug zu dem Strömungsquerschnitt eines Versuchskanals

Wie Abbildung 50 zeigt, verändern sich die Strömungsverluste mit zunehmendem Querschnitt immer weniger. Ein Querschnitt wie beim Strömungskanal des Staubbekämpfungs- Versuchsfelds ist dementsprechend günstiger.

Da die Geschwindigkeit - auch unabhängig von Störquellen - im Querschnitt ungleichmäßig verteilt ist, ist die Staubkonzentration lokal unterschiedlich. Daher gibt die DIN-Vorschrift in Abhängigkeit zu den Strömungsflächen eine virtuelle Unterteilung in Messzonen, um eine repräsentative Staubmessung durchführen zu können (Tabelle 13 und Tabelle 14).

Fläche des Messquerschnitts [m ²]	Kanaldurchmesser [m]	Mindestanzahl von Messachsen (Durchmesser)	Mindestanzahl von Messpunkten je Ebene
< 0,1	< 0,35	.	1 ^a
0,1 bis 1,0	0,35 bis 1,1	2	4
1,1 bis 2,0	1,1 bis 1,6	2	8
> 2,0	> 1,6	2	Mind. 12 und 4 je m ² ^b
<p>a Bei nur einem Messpunkt sind Fehler möglich, die größer sind, als die in dieser Norm angegebenen Fehler.</p> <p>b Bei großen Abgaskanälen sind in der Regel 20 Messpunkte ausreichend.</p>			

Tabelle 13: Messbereichsaufteilung nach DIN 13284-1 für runde Querschnitte/DIN/

Fläche des Messquerschnitts m ²	Mindestanzahl von Seitenunterteilungen ^c	Mindestanzahl von Messpunkten
<0,1	-	1 ^b
0,1 bis 1,0	2	4
1,1 bis 2,0	3	9
>2,0	≥3	mindestens 12 und 4 je m ² ^c
<p>a Bei nur einem Messpunkt sind Fehler möglich, die größer sind, als die in dieser Norm angegebenen Fehler.</p> <p>b Bei großen Abgaskanälen sind in der Regel zwanzig Messpunkte ausreichend.</p> <p>c Andere Seiteneinteilungen können nötig sein, wenn beispielsweise die längste Seite mehr als doppelt so lang ist wie die kürzeste.</p>		

Tabelle 14: Messbereichsaufteilung nach DIN 13284-1 für rechteckige Querschnitte /DIN/

Da bei einem Querschnitt von 1 m² potentielle Strömungsverluste durch Messinstrumente unwesentlich höher als bei der Variante mit 1,5 m² sind und die Anzahl an Messpunkten deutlich reduziert werden kann, wurde ein Rechteckkanal mit 1 m Kantenlänge gewählt. Der Kanal wurde aus jeweils 2 m langen Einzelsegmenten zusammengesetzt. Abbildung 51 zeigt den ersten Konstruktionsentwurf des Versuchsstands.

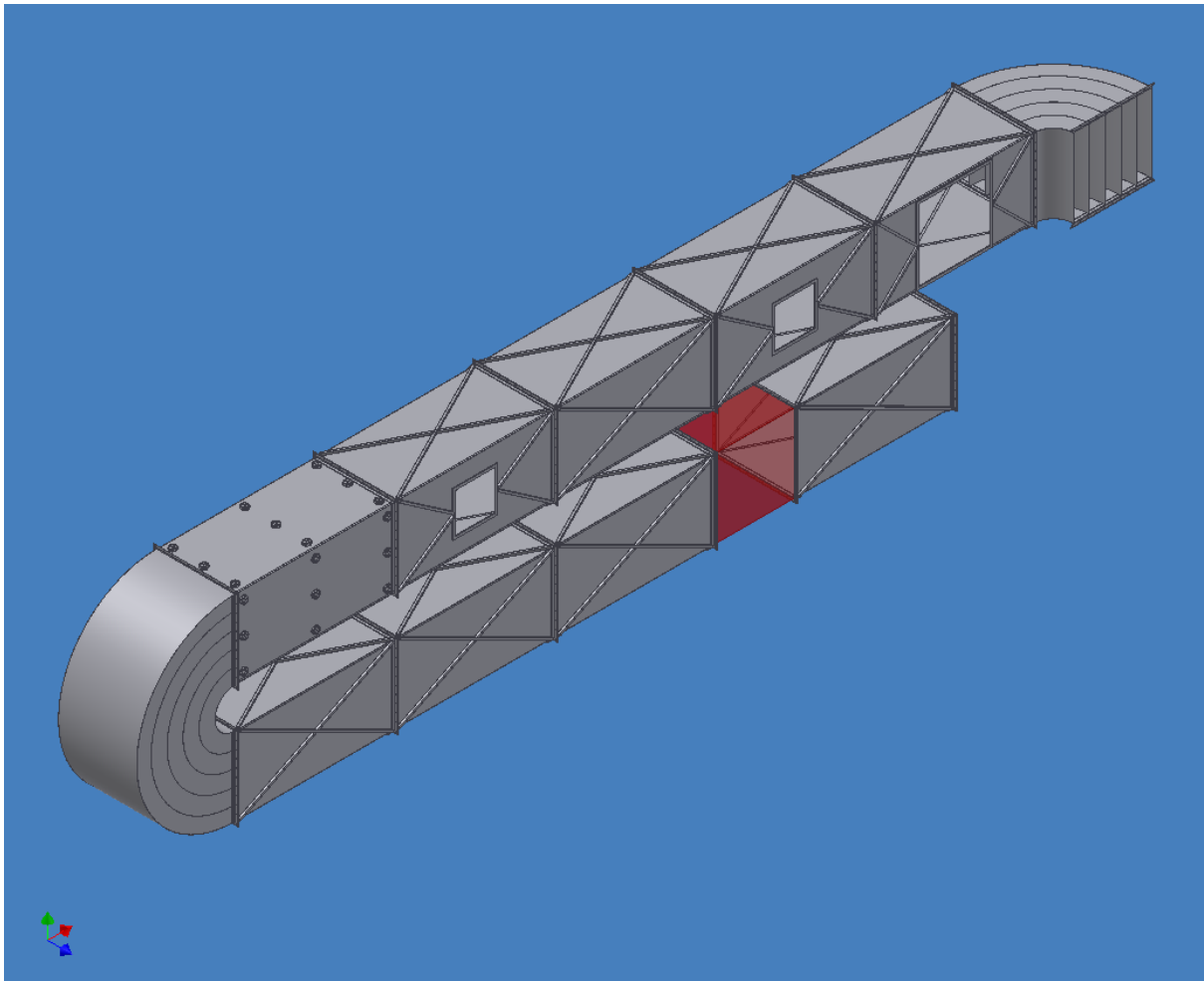


Abbildung 51: Aufbau des Versuchsstands

Im Wesentlichen besteht die Versuchsanlage aus 5 Komponenten (siehe Abbildung 51):

1. Luftansaugstrecke mit Heizeinrichtung (unterer Teil des Kanals)
2. Krümmer als Verbindung zwischen oberem und unterem Kanalabschnitt
3. Messstrecke (oberer Teil des Kanals)
4. Krümmer
5. Lüfter und Abluftlutte (im Bild nicht dargestellt)

Um eine entsprechende Beruhigungszone im Ansaugbereich zu gewährleisten, wurde der bereits genannte Ansaugkanal aus Platzgründen unter dem eigentlichen Messstreckenbereich angeordnet (Abbildung 52).



Abbildung 52: Ansaugstrecke des Versuchskanals

Diese Anordnung erfordert den Einbau eines Krümmers. Leitbleche im Krümmer sorgen dabei für eine Vergleichmäßigung der Strömung (Abbildung 53).



Abbildung 53: Leitbleche im Krümmer

Die Messstrecke ist unterteilt in die Teilbereiche Staubaufgabe, Bedüsungsbereich und Staubentnahme. Die Abstände ergeben sich aus den Anforderungen der Staub-

entstehung und der Staubmesstechnik (Abbildung 54).

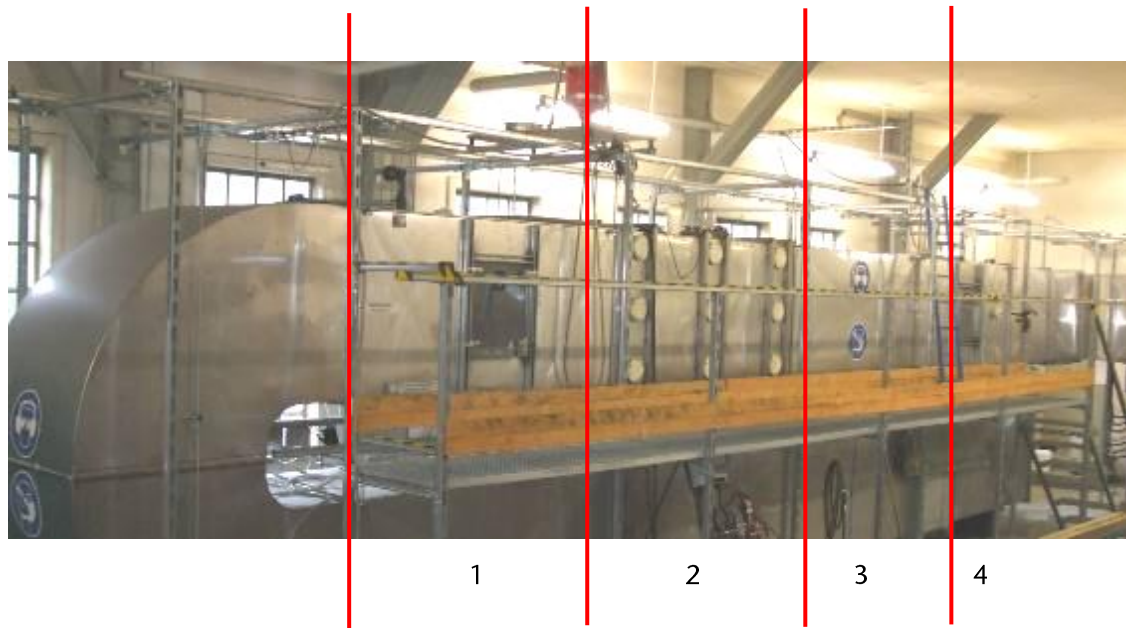


Abbildung 54 : Messstrecke mit Staubaufgabe (1), Bedüsungsbereich (2), Beruhigungszone (3) und Staubentnahme (4)

Hinter der Messstrecke schließt sich, zur Vergleichsmäßigung der Strömung, ein gerades Rohrstück und ein mit Gleitblechen versehener Krümmer an. Daran ist ein über die Drehzahl regelbarer Lüfter der Firma Korfmann (Typ ESN 6-150) (Abbildung 55) mit der in Abbildung 56 dargestellten Lüfterkennlinie angeflanscht.



Abbildung 55: Lüfter der Firma Korfmann

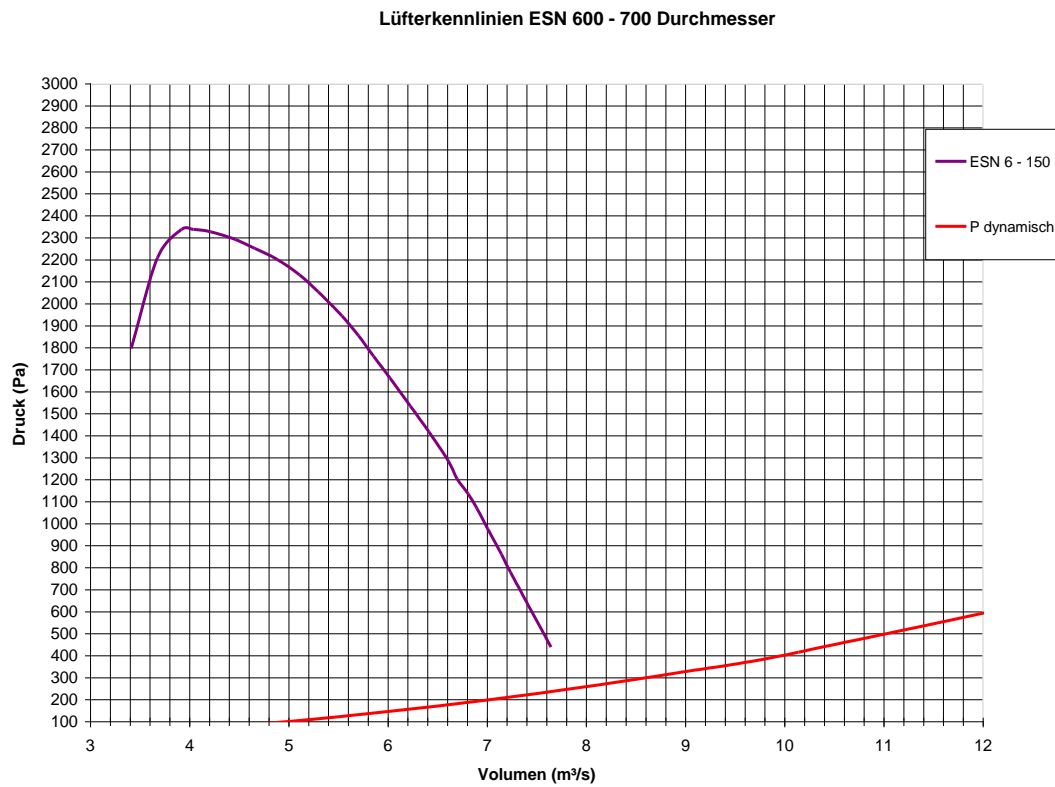


Abbildung 56: Lüfterkennlinie /7/

Die vom Lüfter aus dem Windkanal abgesaugte Luft wird über Spirallutten aus der Halle in ein Sammelbecken geleitet.

9.2 Nachbildung des Gesamtsystems der Staubreduzierung durch Bedüsung

Für das Gesamtsystem Staubreduzierung durch Bedüsung müssen folgende Komponenten bzw. Umgebungseinflüsse betrachtet werden:

Komponenten des Gesamtsystems

1. Bedüsungseinrichtung

- a Bedüsungseinrichtung für die schneidende Gewinnung
- b Bedüsungseinrichtung für die schälende Gewinnung
- c Bedüsungseinrichtung für Übergaben

(bei allen Bedüsungseinrichtungen muss Nachbarschaftswirkung durch mehrere Düsen berücksichtigt werden)

2. Staubentstehung

Umgebungseinflüsse

1. Wärmequellen

- a Gebirgswärme
- b Wärme durch das Fördergut
- c Wärmeaufnahme des Wassers

2. Kühlung

- a Wetterkühlung
- b Kühlung des Wassers

3. Luftbewegung und Lufttemperatur

4. Luftfeuchtigkeit

5. Auswirkungen von Tensiden

Zu dem Gesamtsystem gehört im weiteren Sinne auch die Messtechnik; dabei sollten bei der Staubmesstechnik die bei der Gewinnung tatsächlich eingesetzten Verfahren der Staubmessung berücksichtigt werden.

9.2.1 Bedüsungseinrichtungen im Versuchsstand

Für die Bedüsungseinrichtungen wird das zweite Segment der Messstrecke auf allen Seiten mit runden Öffnungen versehen, die mit Kunststoffdeckeln verschlossen werden können (Abbildung 57).



Abbildung 57 : Segment für die Bedüsungseinrichtungen

In die Öffnungen können je nach Bedüsungseinrichtung die jeweiligen Düsen angeordnet werden.

Für die Nachbildung der Walzenbedüsung wird ein Meißelhalter mit Düse direkt an einem Kunststoffdeckel befestigt, so dass die Wasserzufuhr ohne zusätzliche Schläuche im Kanal gewährleistet werden kann (Abbildung 58 ff.).



Abbildung 58: Meißelhalter im Kanal



Abbildung 59: Wasseranschluss für die Bedüsung am Meißelhalter



Abbildung 60: Wasseranschluss für die Bedüsung

Um die Kühlung und die etwaige Veränderung des Tropfenspektrums nachzubilden, wird der Meißel originalgetreu nachgebaut und mit Heizelementen ausgestattet (Abbildung 61).



Abbildung 61: beheizbarer Meißel

Bei der Konstruktion wird entsprechend der Untersuchung nach Wilhelm /55/ die Wärme in die Spitze eingeleitet, an der bei Betrieb die höchste Temperatur vorliegt. Die Wärme wird dann über das Metall auf den Meißelkörper verteilt. Eine Gummidichtung dient als Isolator zwischen Meißel und dem Meißelhalter.

Bei der Hobelgassenbedüsung und bei den Übergaben ist die Bedüsung einfacher nachzubilden. Im Prinzip handelt es sich um eine Düse, die die Staubwolke entweder schräg (Hobelgasse) oder von oben besprüht. Dementsprechend werden Kunststoffdeckel mit Bohrungen versehen. Für die Hobelgassenbedüsung werden die oberen Reihen des Bedüsungssegments verwendet. Die Düsen sind in einem Winkel von 45° angebracht (Abbildung 62).



Abbildung 62: Halterung für Meißelbedüsung

Für die Übergabebedüsung kann eine mittige Anordnung der Düse vorgesehen werden (Abbildung 63).



Abbildung 63: Halterung für Düsen bei einer Übergabe

Bei beiden Bedüungsarten können unterschiedliche Orte in dem Bedüungssegment genutzt werden und es besteht neben einer örtlich unterschiedlichen Anordnung auch die Möglichkeit, mehrere Düsen gleichzeitig einzubauen. Mit der letztgenannten Variante kann die Beeinflussung durch benachbarte Düsen untersucht werden (Nachbarschaftseffekt).

Neben der eigentlichen Anordnung der Düsen muss auch die Zuführung des Bedüungswassers dargestellt werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Wasser durch die Umgebungseinflüsse unter Tage in der Regel Umgebungstemperatur annimmt.

Der Volumenstrom des Wassers wird über den Wasserdruck mit Hilfe von Regelventilen gesteuert; dabei wird eine Dosiergenauigkeit von 0,5 bar erreicht. Es sind drei separat regelbare Wasserkreisläufe mit eigenen Manometern und Volumenmessgeräten vorgesehen (Abbildung 64).



Abbildung 64: Regelung für das Bedüsungswasser

Das Wasser kann entweder direkt aus dem Wasserhahn über eine Druckerhöhungspumpe (Abbildung 65) versprüht werden oder aus Vorratsbehältern.



Abbildung 65: Druckerhöhungspumpe

Durch die Vorratsbehälter (Abbildung 66) sind Versuche mit Tensiden möglich. Auch die Erwärmung des Bedüsungswassers durch die Umgebungseinflüsse kann nachgebildet werden.



Abbildung 66: Vorratsbehälter

Die Wärme des Wassers wird durch eine Heizspirale im Vorratsbehälter (nicht dargestellt) erzeugt. Alle Zuleitungen zu den Düsen wurden gedämmt. Tritt das Wasser in kühlere Luft aus, so kommt es zu einer Abkühlung, die vom Bedüsungswasserdruck abhängig ist. Je schneller warmes Wasser nachströmt, desto konstanter ist die Temperatur am Austritt (Abbildung 67).

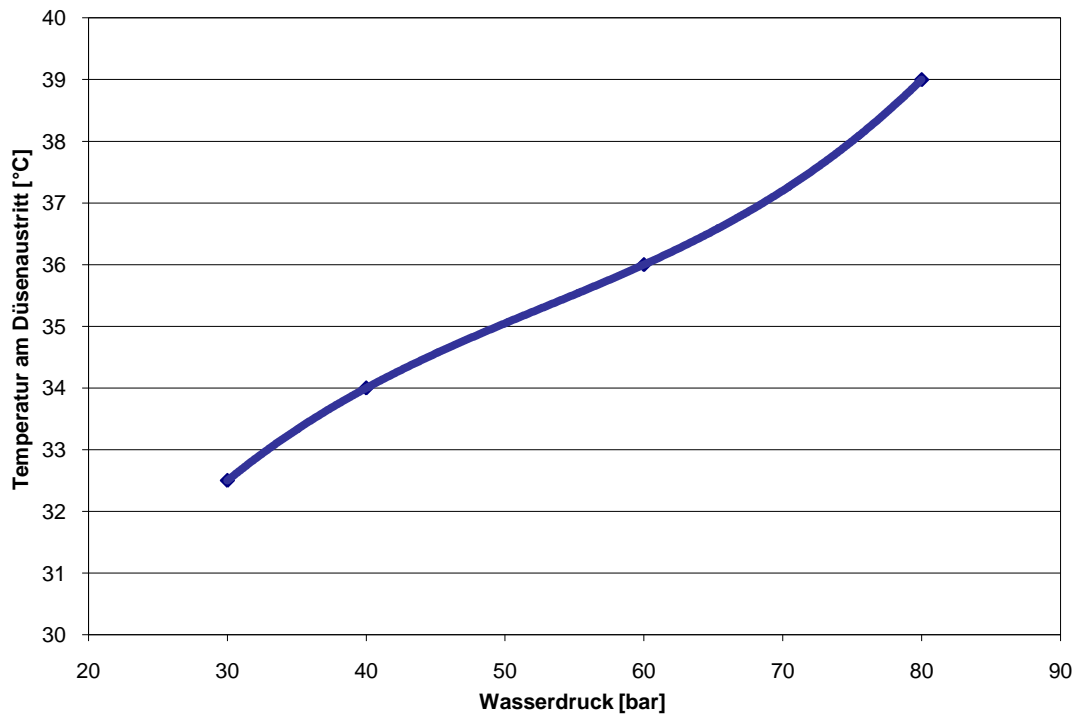


Abbildung 67: Wärmeverlust beim Bedüsungswasser bei einer Anfangstemperatur von 40°C

Die Wärmeverluste müssen bei der Wassertemperaturvorgabe berücksichtigt werden. Dafür wurde eine manuelle Regelungseinheit vorgesehen (Abbildung 68); die Temperatur an der Düse wird mit Hilfe einer Messsonde abgeglichen.



Abbildung 68: Regelungseinheit für die Wassertemperatur

9.2.2 Staubentstehung im Versuchsstand

Wie bereits erwähnt unterscheidet sich die Staubentstehung und -bekämpfung je nach Art des Gewinnungsverfahrens. Durch den Kohlenhobel wird die Kohlenfront schälend bearbeitet und die feinen Staubpartikel werden durch den freien Wetterstrom in der Hobelgasse beschleunigt. Die Staubaufgabe kann hier relativ einfach ausgeführt werden. Es muss lediglich gesichert sein, dass an der Bedüsungsstelle eine über den Querschnitt ausreichend verteilte Staubwolke vorliegt. Die austretenden Staubkörner sedimentieren in einem reinen Gasstrom in Abhängigkeit zu ihrer Masse und Flugweite. Es tritt somit eine Windsichtung auf. Die Flugbahnen der Staubkörner verlaufen bei einer gleichmäßigen Bewetterung in Strömungsrichtung. Um eine hohe Verteilung der Körner zu erreichen, sollte daher der Gasstrom turbulent sein. Eine derartige Situation liegt im oberen Teil des Windkanals hinter dem Krümmer vor. Aus diesem Grund erfolgt die Staubaufgabe für die schälende Gewinnung unmittelbar hinter diesem Krümmer. Eine vergleichbare Situation der Staubverteilung liegt im Bereich der Übergaben (Streb, Strecken, Bandabwurf etc.) vor. Daher wird hierfür der gleiche Ort gewählt.

Die Staubaufgabe für die schneidende Gewinnung wird in das zweite Segment eingebaut. Die realitätsnahe Abbildung der Staubaufgabe ist hierbei schwieriger als bei der schälenden Gewinnung bzw. der Übergabe. Der Staub entsteht punktuell direkt am Meißel. Prinzipiell muss er daher über ein Rohr an die Meißelspitze geführt werden. Durch die unmittelbar am Meißel stattfindende Bedüsung wird jedoch das Staubzuführungsrohr feucht und die Staubpartikel agglomerieren (Abbildung 69).



Abbildung 69: Bedüsung bei der schneidenden Gewinnung

Es werden verschiedene Versuche durchgeführt bei denen jeweils eine Staubmenge von 1000 g aufgegeben wurde. Mit zunehmendem Luftdruck wird die Staubmenge unterschiedlich schnell eingeblasen (Tabelle 15).

Versuche	Abstand der Staubaufgabe be zur Meißelspitze	Ejektordruckluft	Luftgeschwindigkeit im Kanal	Agglomeration	Dauer zum Verblasen von 1000 g Staub = Messdauer	Staubmenge
	cm	bar	m/s		min : s	g
1	0	0,5	1	ja	-	-
2	5	0,5	1	ja	-	-
3	5	1	1	nein	11:45	0,0630
4	5	1,5	1	nein	06:55	0,0602
5	5	2	1	nein	04:15	0,0492
6	8,5	1,5	1	nein	06:20	0,0583
7	8,5	2	1	nein	03:45	0,0564
8	8,5	3	1	nein	02:09	0,0560

Tabelle 15: Ergebnisse der Untersuchung der Staubaufgabe

Versuche einer direkten Aufgabe auf die Meißelspitze führten dazu, dass die Rohrquerschnitte bereits bei 0,5 bar Luftdruck nach wenigen Minuten starke Ablagerungen aufweisen (Abbildung 70).



Abbildung 70: Agglomerationen im Staubaufgaberohr

Ähnliche Erscheinungen zeigen sich auch bei einem Abstand von 5 cm. Bei 0,5 bar Luftdruck kann ein Verstopfen nur vermieden werden, wenn das Rohr ausreichend trocken ist. Um diesen Zustand herbeizuführen, muss es nach jedem Versuchsgang getrocknet oder erhitzt werden. Beide Varianten sind für praktikable Versuchsdurchführungen nicht sinnvoll. Erst ab einem Luftdruck von 1 bar kann die Staubmenge ausgeblasen werden, ohne dass es zu Ablagerungen kommt. Durch die Druckerhöhung wird die Luftgeschwindigkeit erhöht und dadurch feine Wassertropfen am Ejektorkanal weggeblasen.

Die ermittelte Staubmenge ist jedoch bei einem Abstand von 5 cm je nach Ejektorluftdruck unterschiedlich. Insbesondere die Erhöhung von 1,5 auf 2 bar bringt eine Verringerung der ermittelten Staubmenge um knapp 20 %.

Durch den Ejektordruck erfahren die Staubpartikel eine vertikale Beschleunigung

bzw. Beschleunigungskraft nach unten. Senkrecht zu dieser Beschleunigung wirkt eine horizontale Kraftkomponente durch die Luftströmung im Kanal.

Daraus ergibt sich eine relative Beschleunigung. Je stärker die senkrechte Komponente ist, desto weniger wird die Flugbahn des Staubkorns aus der Vertikalen abgelenkt. Der Staubstrahl wird dadurch weniger aufgeweitet und direkt in den Sprühstrahl des Wassers geleitet. Im Inneren dieses Fluidstrahls liegt eine höhere Wasserdichte vor und somit kann mehr Staub gebunden werden.

Abbildung 71 zeigt den Staubstrahl bei 1 bar Luftdruck. Es ist zu erkennen, dass ein Teil der Staubpartikel über dem Wasserstrahl in Schwebelage gehalten wird. Die Flugbahn der Staubpartikel ist in diesem Fall wesentlich durch die horizontal wirkende Luftströmung im Kanal beeinflusst. Der feine Staub wird durch den Luftstrom erfasst und abtransportiert.



Abbildung 71: Staubaufgabe bei 1 bar Ejektorluftdruckstrom

In Abbildung 72 ist die Staubaufgabe bei einem Ejektorluftdruck von 2 bar dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Staubstrahl gebündelt ist. Die horizontale Luftkomponente hat weniger Einfluss auf die Flugbahn der Partikel als die vertikale.



Abbildung 72: Staubaufgabe bei 2 bar Ejektorluftdruckstrom

Ab einem Abstand des Ejektors von 8,5 cm gibt es ein stabileres Messergebnis, unabhängig von dem Ejektorluftdruck und vom Feuchtigkeitsgrad im Rohr (vergleiche Tabelle 15).

Die folgenden Abbildungen zeigen die Staubaufgabe bei einem Abstand von 8,5 cm bei unterschiedlichen Ejektorluftdrücken. Es ist zu erkennen, dass ein Teil des Staubstroms oberhalb des Sprühstrahls schwebt. Durch den großen Abstand zwischen Sprühstrahl und Staubaustritt verwirbelt die Luft den Staubstrom scheinbar unabhängig von dem Ejektorluftdruck. Die vertikale Beschleunigung spielt damit eine untergeordnete Rolle. Das zeigt sich auch in den Messergebnissen nach Tabelle 15, denn durch den zunehmenden Druck wird zwar die Zeit zum Verblasen des Staubs geringer, die ermittelte Staubmenge bleibt aber konstant. Dieser Sachverhalt lässt sich nur dadurch erklären, dass die Staubpartikel schneller in den Schwebезustand gelangen und nicht in den Sprühstrahl gelenkt werden. Anders als bei dem Abstand von 5 cm beeinflusst dadurch die vertikale Beschleunigungskomponente das Ergebnis nicht (Abbildung 73 ff.).



Abbildung 73: Staubaufgabe bei 1,5 bar Ejektorluftdruckstrom und 8,5 cm Abstand



Abbildung 74: Staubaufgabe bei 2 bar Ejektorluftdruckstrom und 8,5 cm Abstand



Abbildung 75: Staubaufgabe bei 3 bar Ejektorluftdruckstrom und 8,5 cm Abstand

Um den „idealen“ Abstand zwischen Meißel und Staubaufgabe weiter zu minimieren, wird ein Trichter eingesetzt, der den Ausströmquerschnitt vor dem Bedüsungswasser schützt. Damit soll verhindert werden, dass Ablagerungen den freien Austritt des Staubstrahls verhindern (Abbildung 76).



Abbildung 76: Trichter zur Vergrößerung des Staubaustritts

Bei allen Versuchen kann die erforderliche Staubmenge ausgeblasen werden (Tabelle 16), es bilden sich jedoch größere Agglomerationen am Trichterrand aus (Abbildung 77). Durch plötzliches Lösen größerer Staubansammlungen würde dies zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen.

Versuche	Ejektordruckluft	Luftgeschwindigkeit im Kanal	Agglomeration	Staubmenge in der Aufgabe	Dauer zum Verblasen von 1000 g Staub = Messdauer	Ermittelte Staubmenge
	bar	m/s		g	min : s	g
9	1	1	(ja)	1000	08:00	0,0707
10	1,5	1	(ja)	1000	04:05	0,0668
11	2	1	(ja)	1000	03:45	0,0967
12	3	1	(ja)	1000	01:30	0,0835

Tabelle 16: Ergebnisse der Untersuchung der Staubaufgabe mit einem Trichter



Abbildung 77: Agglomerationen am Trichter

Als Ergebnis dieser Vorversuche ist daher festzuhalten:

Für den Versuchsaufbau soll ein Abstand von 8,5 cm ohne Trichter und ein Ejektorluftdruck von 1,5 bar angewendet werden, da es in erster Linie zu keiner Verstopfung des Ausblasrohrs kommt.

Die Staubmenge wird dabei über einen volumetrischen Schneckendosierer mit eingebauter Waage vom Typ DCC31 der Firma Lutterberg geregelt (Abbildung 78).



Abbildung 78: Staubdosiereinrichtung mit Ejektor (Kreis)

In Anlehnung an bisherige Versuche wird eine Staubmenge von 60 g/min mit Hilfe des Ejektors aus der Schnecke in den Kanal geblasen. Die Regulierung erfolgt über die Drehzahl des antreibenden Elektromotors und ist je nach Staubart unterschiedlich. Die Umrechnungsfaktoren werden für DIN Schieferstaub ermittelt (Abbildung

79 und Abbildung 80).

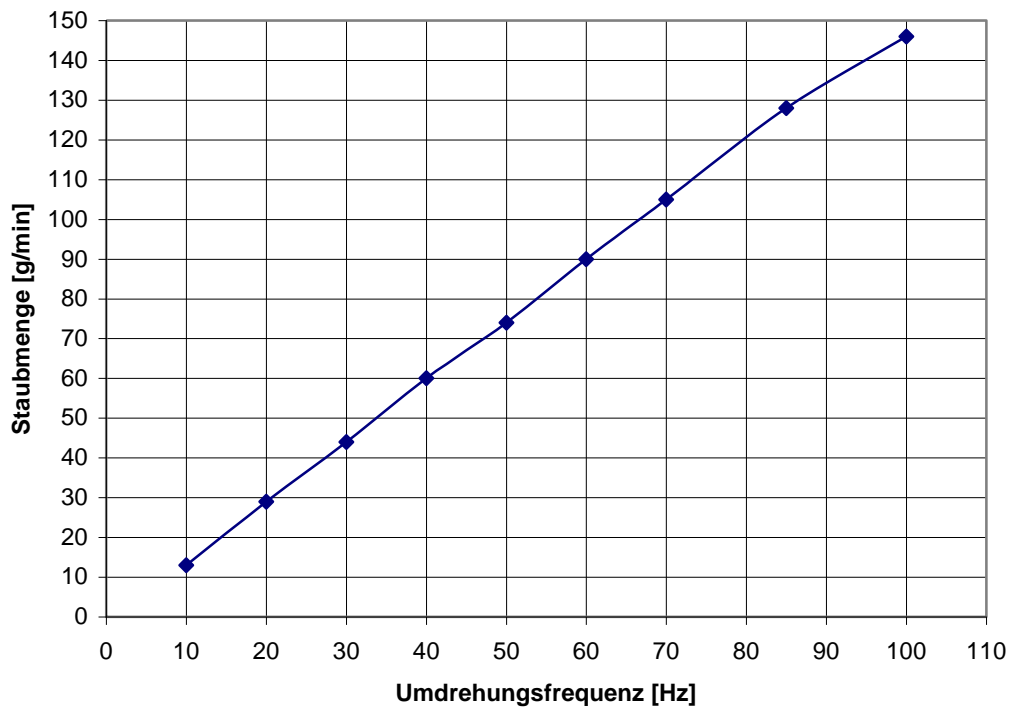


Abbildung 79: Zusammenhang zwischen Staubmenge und Umdrehungsfrequenz bei Schieferstaub

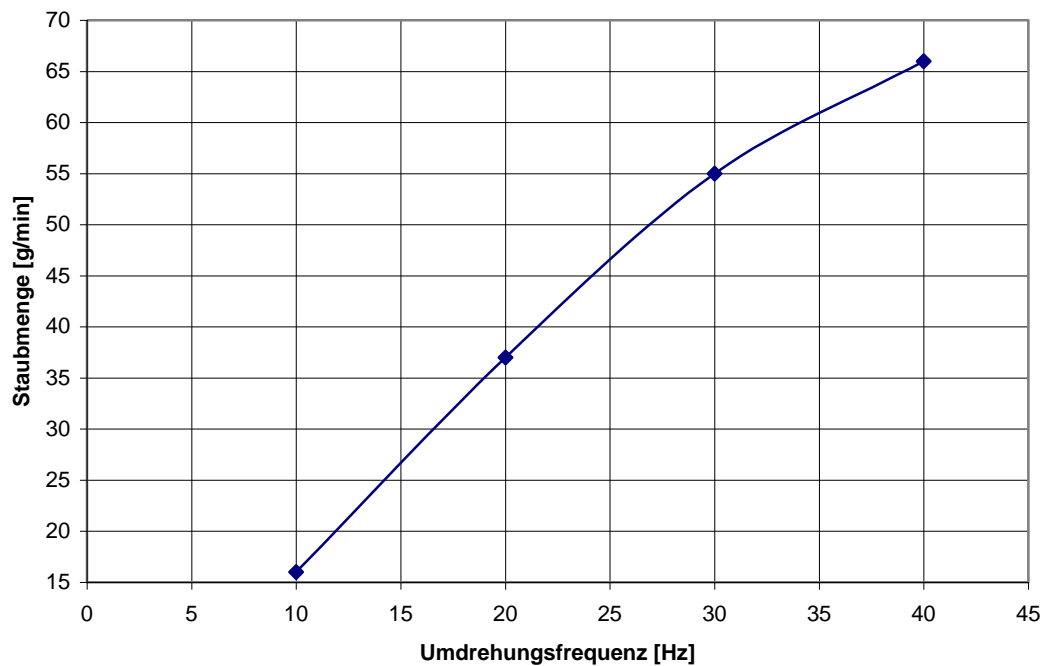


Abbildung 80: Zusammenhang zwischen Staubmenge und Umdrehungsfrequenz bei Kohlenstaub aus dem Bergwerk Ibbenbüren

9.2.3 Darstellung der Umgebungseinflüsse

In Anpassung an die unter Tage vorhandenen Bedingungen wird überprüft, inwieweit sich die wichtigsten klimatischen Faktoren Feuchtigkeit, Temperatur und Luftgeschwindigkeit nach Möglichkeit realitätsnah in die Versuche einpassen lassen. Der untertägige Luftdruck lässt sich nicht abbilden, da der Messkanal kein von der Umgebung isoliertes Drucksystem darstellen kann. Die Luft müsste hierbei in einem geschlossenen System arbeiten, bzw. müsste der An- und Absaugvorgang der Luft über Druckschleusen erfolgen. Dies ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wirtschaftlich nicht realisierbar.

Die Umgebungswärme wird durch ein elektrisches Heizregister erzeugt, welches unmittelbar hinter dem Lufteinlass des Kanals angeordnet ist. Die Temperatur ist regelbar und die Leistung des Heizregisters beträgt $P = 280 \text{ kW}$. Dadurch wird gewährleistet, dass auch bei hohen Wettergeschwindigkeiten hohe Lufttemperaturen realisiert werden können.

Die Lufttemperatur im System kann bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen nahezu konstant gehalten werden. Zunächst wird keine Erwärmung der Luft vorgenommen und dann wird der Kanal so erwärmt, dass am Ende der Messstrecke 40°C erreicht werden.

Messfühler 1 befindet sich vor der Bedüsung und gibt die Temperatur der zugeführten Luft wieder. Messfühler 2 wird nahe vor der Bedüsung angeordnet. Die Abkühlung zwischen diesen Messfühlern beträgt nur 3 % und ist daher vernachlässigbar. Erst durch die Bedüsung zeigt der Messfühler 3 einen deutlichen Unterschied von über 10 % zu den Fühlern 1 und 2 (Abbildung 81).

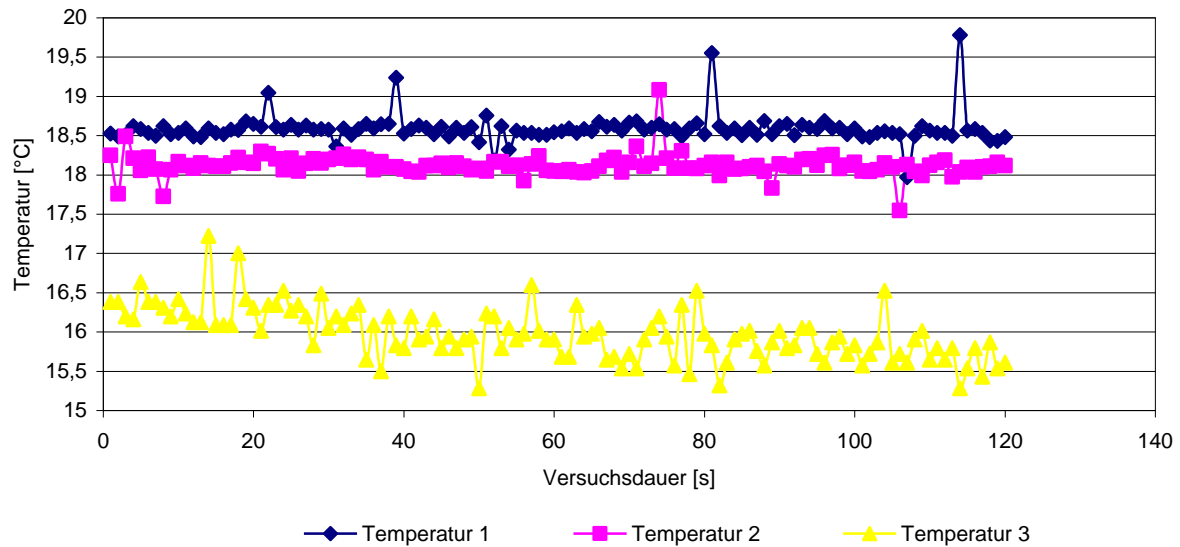


Abbildung 81: Temperaturen bei einem Bedüsnungsversuch ohne Erwärmung der Luft

Wird der Kanal vorgeheizt, so dass in der Messstrecke ca. 40 °C (Messfühler 3) auftreten, bleiben die prozentualen Differenzen zwischen den Messfühlern annähernd konstant. Die angesaugte Luft kann gleichmäßig erhitzt und die Temperatur dabei konstant gehalten werden. Die Einstellung unterschiedlicher Temperaturen ist also aufgrund stabiler Versuchsbedingungen möglich (Abbildung 82).

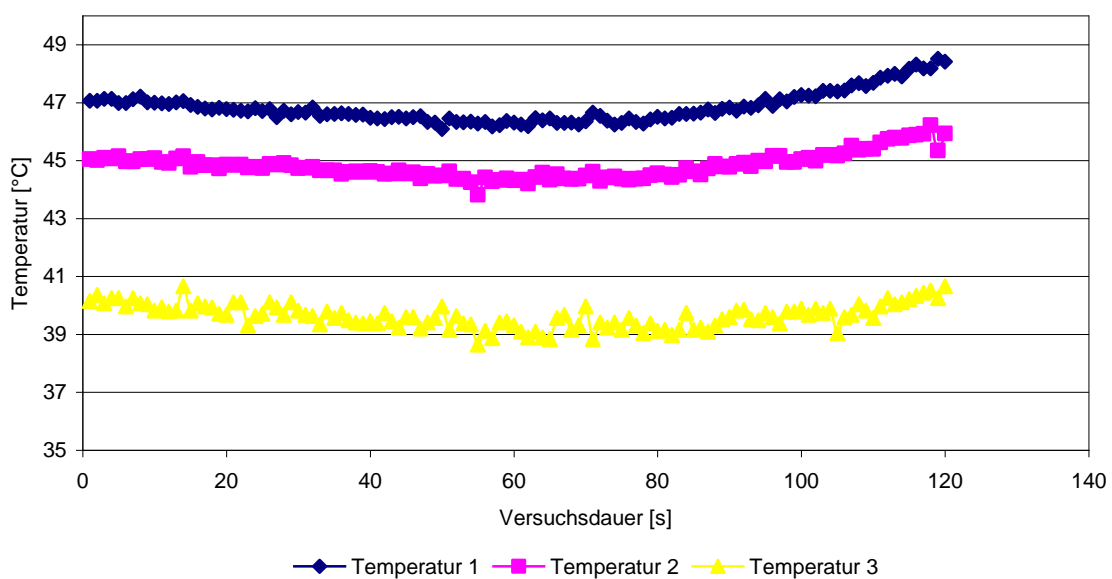


Abbildung 82: Temperaturen bei einem Bedüsnungsversuch mit 40°C Ausgangstemperatur

Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit soll durch Zugabe von Wasserdampf ermittelt werden. Es zeigt sich jedoch, wie schon bei Armbruster /19/, dass mit dieser Maßnahme keine stabilen Luftfeuchten im Kanal erreicht werden können. Der Wasserdampf wird kurz vor dem Feuchtesensor 1 (Feuchte 1) in den Windkanal eingeleitet. Die Luftfeuchtigkeit an diesem Sensor erreicht zunächst einen konstanten Wert um die 60 bis 65 %. Es kommt dann zu einer weiteren unkontrollierbaren Erhöhung auf nahezu 80 %.

Die Luftfeuchtigkeit (Feuchte 2 und 3) im oberen Teil des Windkanals steigt zunächst „schlagartig“ an. Danach verringert sich die Steigung und nach Erreichen eines Maximums nimmt die Luftfeuchtigkeit wieder ab (Abbildung 83).

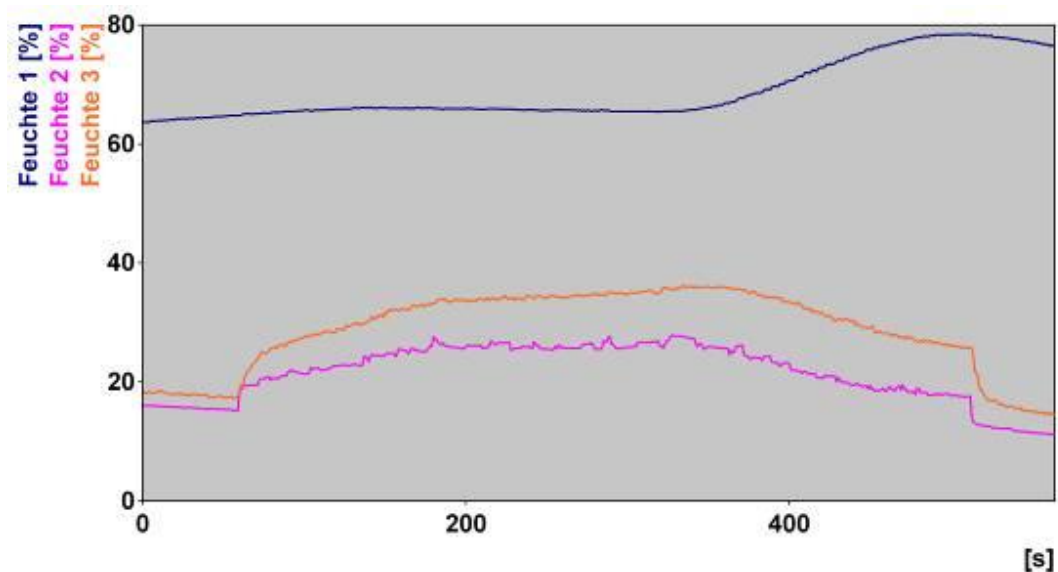


Abbildung 83: Verlauf der Luftfeuchtigkeit bei Zufuhr von Wasserdampf

Der Grund dafür liegt vermutlich darin, dass dem Luftstrom nicht kontinuierlich Wasserdampf zugeführt werden kann. Die Luftfeuchtigkeit im oberen Bereich des Kanals – also im Messraum – kann nicht auf die Werte erhöht werden, die im Steinkohlenbergbau erreicht werden. Da sich außerdem eine angestrebte Luftfeuchtigkeit nicht über einen längeren Zeitraum stabil halten lässt, wird auf eine Veränderung der Luftfeuchtigkeit verzichtet.

Der Wetterstrom wird durch einen saugenden Lüfter nachgebildet. Um die genaue Geschwindigkeit insbesondere im Bereich der Staubaufgabe und der Staubentnahme (s.o.) anhand der Drehzahl des Lüfters abzuschätzen, werden Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Für den Bereich der Staubaufgabe wird zusätzlich eine mittlere Geschwindigkeit nach dem Schwerlinienverfahren ermittelt (Tabelle 17).

Lüfterdrehzahl	600	2000	3000
Mittlere Geschwindigkeit	0,9 m/s	3,32 m/s	5,04 m/s

Tabelle 17: Ergebnisse des Schwerlinienverfahrens

Die durch dieses Verfahren ermittelte Wettergeschwindigkeit stellt einen Mittelwert dar, wie es die VDI 2640 /VDI/ vorgibt. Je nach dem zu untersuchenden Einsatzfall muss eine entsprechende Geschwindigkeit gewählt werden: Die Strebgeschwindigkeit liegt bei größer/gleich 3 m/s und ist nahezu gleich mit der Geschwindigkeit bei der schälenden Gewinnung. Daher soll für diesen Bereich mindestens eine Lüfterdrehzahl von 2000 U/min angesetzt werden. Beim schneidenden Verfahren liegt die Staubentstehung in einem wettergeschützten Bereich, daher ist der Einfluss der Wettergeschwindigkeit im vorliegenden Fall als sehr gering einzuschätzen. Hier ist es daher angebracht, eine Drehzahl von 600 U/min zu verwenden.

9.3 Messtechnik

Prinzipiell müssen zwei verschiedene Messarten

1. Tropfenanalyse
2. Messung der Staubkonzentration

durchgeführt werden. Darüber hinaus müssen die klimatischen Faktoren

1. Luftfeuchtigkeit
2. Luftgeschwindigkeit
3. Temperatur
4. Wasserdruck

als Grundlagen für die Interpretation beider Messarten ermittelt werden.

In Anlehnung an die Referenzversuche sollte die Versuchsanlage, wie in Abbildung 84 schematisch dargestellt, aufgebaut sein.

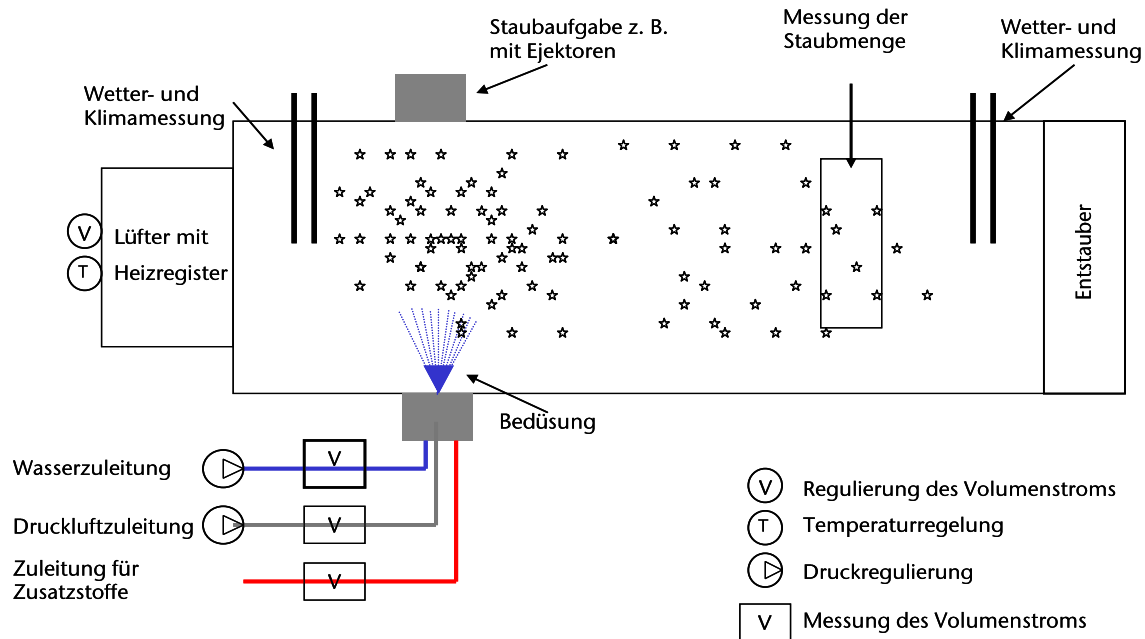


Abbildung 84: Schematische Übersicht des Windkanals am Institut für Bergbau

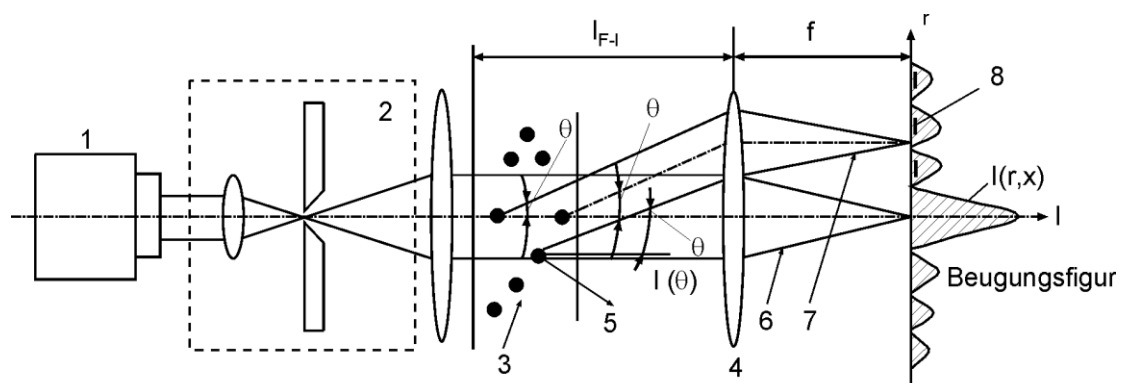
9.3.1 Tropfenanalyse

Für die Tropfenanalyse wird das Verfahren der Laserbeugungsspektrometrie angewendet, das zu den Standardverfahren für die Messung von Tropfengrößenverteilungen zählt und sich durch kurze Analysezeiten und gute Reproduzierbarkeit auszeichnet. Eingesetzt wird das HELOS-VARIO System der Firma Sympatec GmbH, Clausthal-Zellerfeld mit einem Messbereich bis 1750 μm . Das Gerät (Abbildung 85) gehört zur Gruppe der berührungsfreien Messgeräte. Das physikalische Prinzip der Laserbeugungsspektrometrie beruht auf den Wechselwirkungen zwischen Licht und Tropfen, vergleichbar mit dem optischen Staubmessverfahren.



Abbildung 85: Laserbeugungsgerät Helos-Vario der Firma Sympatec

Das Messgerät basiert auf dem typischen Aufbau des in Abbildung 86 abgebildeten Beispiels nach dem ISO-Standard 13320.



- 1 Laser
- 2 Strahlaufweitungseinheit
- 3 Teilchenensemble
- 4 Fourier Linse
- 5 Streulicht, welches nicht von der Fourier-Linse aufgefangen wird
- 6 Direkter Strahl
- 7 Streustrahl
- 8 Ringdetektor

Abbildung 86: Schematische Darstellung eines Beugungsspektrometers

Ein Lasergerät erzeugt einen parallelen Strahl, der das zu messende Teilchenkollektiv durchstrahlt. Die Strahlaufweitungseinheit, die der Strahl passiert, dient der Optimierung des Strahlbilds mit Hilfe von Filtern.

Durch das zu messende Teilchenkollektiv, in diesem Fall die Tröpfchen, werden die Strahlen unterschiedlich abgelenkt. Das so gestreute Licht wird mit Hilfe einer sogenannten Fourier-Linse auf den dahinterstehenden, in ringförmige Messkanäle unterteilten Detektor focussiert.

Zunächst werden Versuche außerhalb des Windkanals durchgeführt. Dabei wird das Hochdruckschneidspurbedüsungssystem, das bei der schneidenden Gewinnung eingesetzt wird, untersucht. Der Meißelhalter wird auf einen Grundträger montiert, so dass sich Laserstrahl und Sprühstrahl im rechten Winkel treffen (Abbildung 87).

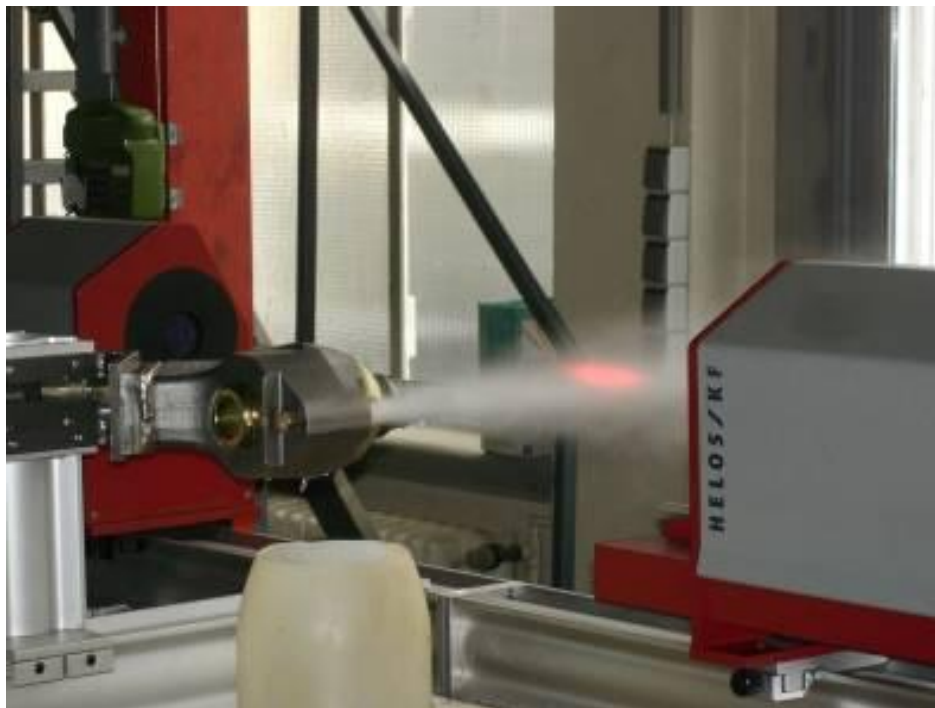


Abbildung 87: Meißelhalter und Laserbeugungsgerät

Diese Voruntersuchungen sollen Erkenntnisse über die Abhängigkeit von Düsendurchmesser und Spritzwinkel zu dem erzeugten Tropfenspektrum aufzeigen. Um die Tropfenspektren möglichst realitätsnah zu untersuchen, wird eine Konstruktion

geschaffen, die das Laserbeugungsgerät direkt in dem Kanal messen kann. Der Laserstrahlerzeuger wird dazu auf einem Gestell auf der einen Seite des Kanals (Abbildung 88) angeordnet und der Detektor auf der gegenüberliegenden (nicht dargestellt).



Abbildung 88: Windkanal mit Laserbeugungsgerät (sichtbar ist nur der Laserstrahlerzeuger)

9.3.2 Messung der Staubkonzentrationen

Die Messung der Staubkonzentrationen ist wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens. Es werden verschiedene lichtoptische und gravimetrische Messmethoden hinsichtlich ihrer Eignung für diesen Messaufbau überprüft. Das wesentliche Problem bei der Verwendung der optischen Geräte entsteht durch die feinen Feuchtigkeitstropfen. Mit diesen Instrumenten werden alle Schwebepartikel gemessen, unabhängig davon, ob es sich um Fluidtropfen oder Staubpartikel handelt /25/.

Als primäres Messverfahren wird daher die Gravimetrie ausgewählt, wie auch bei ähnlichen Versuchen der DMT wird zum Vergleich parallel ein optisches Messinstrument eingesetzt.

Um zu verhindern, dass durch die Probenahme eine Fraktionierung stattfindet und das Messergebnis verfälscht wird, ist nach DIN 2066 „Luft-Analysenverfahren Emissionsmesstechnik 2 Staubmessung in strömenden Gasen“ eine isokinetische (= geschwindigkeitsgleiche) Messung durchzuführen.

Mit isokinetischen Staubsonden wird ein Teilstrom des zu messenden Gases entnommen und zum Staubmessgerät geführt. Wird bei der Probenahme mit einer Geschwindigkeit größer als der Strömungsgeschwindigkeit abgesaugt (hyperkinetische Probenahme), so wird Gas angesaugt, das die Probenahmesonde hätte umströmen müssen. Die darin enthaltenen Partikel können aufgrund ihrer Trägheit nicht der ihnen aufgezwungenen Änderung der Strömungsrichtung folgen. Der gemessene Staubgehalt ist zu niedrig.

Beim Absaugen mit einer Geschwindigkeit kleiner als der Strömungsgeschwindigkeit (hypokinetische Probenahme) strömt Gas, das hätte eingesaugt werden müssen, um die Probenahmesonde herum. Aufgrund ihrer Trägheit können Partikel der Umlenkung nicht folgen und gelangen in die Sonde. Der gemessene Staubgehalt ist zu hoch.

Der Fehler bei zu großer Absauggeschwindigkeit ist geringer als bei einer im gleichen Maße niedrigeren Absauggeschwindigkeit. Dementsprechend bewegt sich das für Staubemissionsmessungen zulässige isokinetische Verhältnis - das Verhältnis der Gasgeschwindigkeiten von abgesaugtem Teilstrom zu Hauptvolumenstrom - zwischen 95 % und 115 % /20, 3/.

Entsprechend den Vorgaben der genannten DIN Vorschrift werden im Querschnitt des Wetterkanals vier Messbereiche eingerichtet (Abbildung 89). Die Messsonde wird jeweils im Mittelpunkt der Quadranten angeordnet.

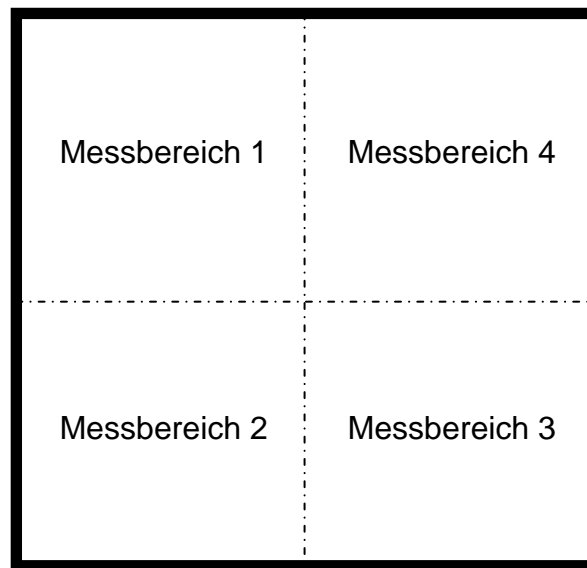


Abbildung 89: Messbereiche im Kanalquerschnitt in Stömungsrichtung
(gestrichelte Linien stellen keine Unterteilung im Kanal dar)

In der Längsachse soll sich die Position der Messsonde nach einer definierten Beruhigungsstrecke hinter der Staubaufgabe befinden. Nach DIN EN 13284-1 soll dafür ein ausreichend homogenes und stabiles Geschwindigkeitsprofil vorliegen.

Grund dafür ist die Beschleunigung und die daraus resultierende Geschwindigkeit der Staubpartikel. Würde in einem Messbereich die Geschwindigkeit der Luft wesentlich höher sein, würden die dort befindlichen Staubpartikel stärker beschleunigt werden als die anderen. Dies würde zu einer ungleichmäßigen Verteilung des Staubs im Querschnitt führen und dadurch das Messergebnis verfälschen.

Um die optimale Position der Messsonde zu ermitteln, wurden 5 Messzonen in der Längsachse eingerichtet:

Messzone 1	= Staubaufgabe (Ausgangspunkt = 0 m)
Messzone 2	= 2,5 m von der Staubaufgabe entfernt
Messzone 3	= 3,5 m von der Staubaufgabe entfernt
Messzone 4	= 4,5 m von der Staubaufgabe entfernt
Messzone 5	= 5,5 m von der Staubaufgabe entfernt

In den jeweiligen Messzonen werden in allen vier Messbereichen die mittleren Geschwindigkeiten der Luft ermittelt. Dabei steht nicht die quantitative Ermittlung der Luftgeschwindigkeit im Vordergrund, sondern die Gleichmäßigkeit der Strömung in den Messbereichen (Abbildung 89). Gleichmäßige Strömungsverhältnisse liegen dann vor, wenn die Luftgeschwindigkeiten nahezu identisch sind.

In keiner Messzone kann ein eindeutig homogenes Geschwindigkeitsprofil ermittelt werden. Unabhängig von der Lüfterdrehzahl ist die Spannweite zwischen maximaler und minimaler Strömungsgeschwindigkeit bei der Messzone 4 am geringsten, so dass hier ein weitgehend homogenes Geschwindigkeitsprofil vorliegt (Abbildung 90 bis Abbildung 92).

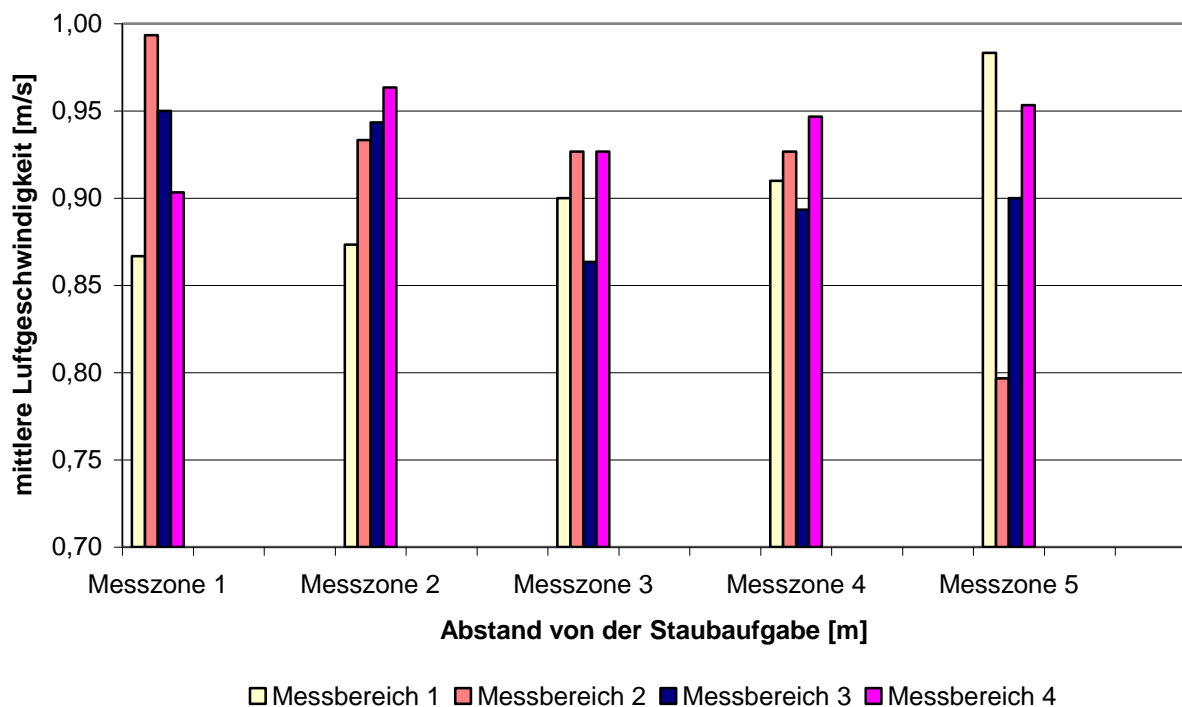


Abbildung 90: Mittlere Luftgeschwindigkeit in Längsrichtung bei 600 U/min
in den jeweiligen Messzonen

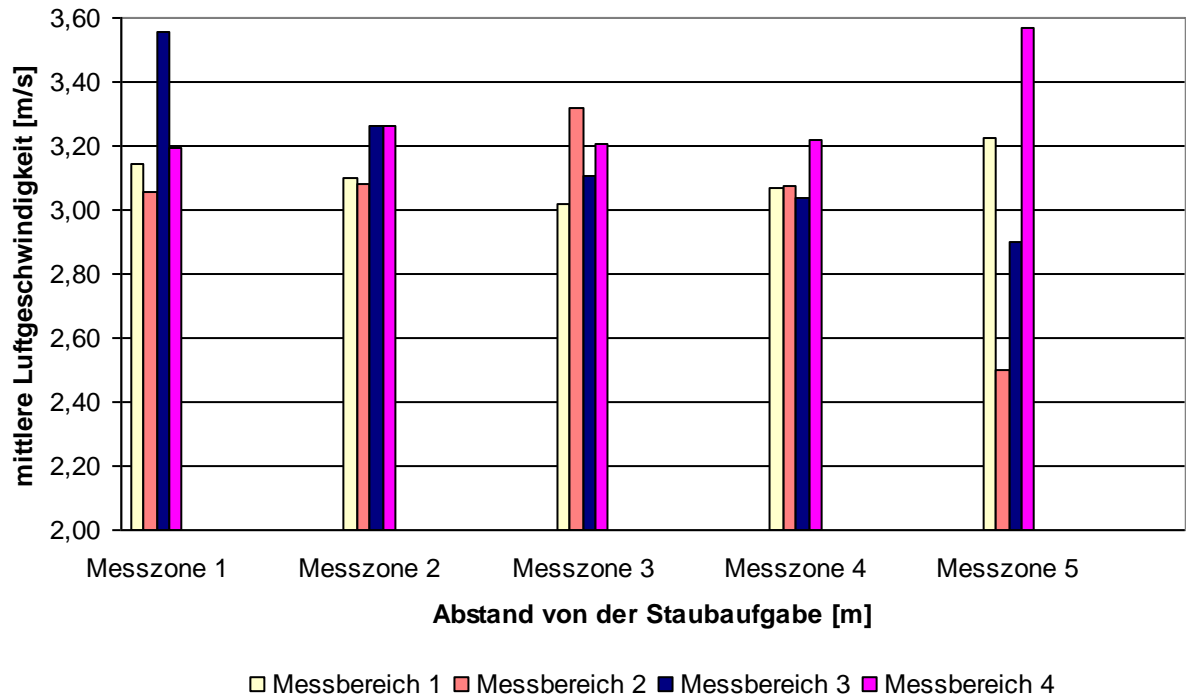


Abbildung 91: Mittlere Luftgeschwindigkeit in Längsrichtung bei 2000 U/min
in den jeweiligen Messzonen

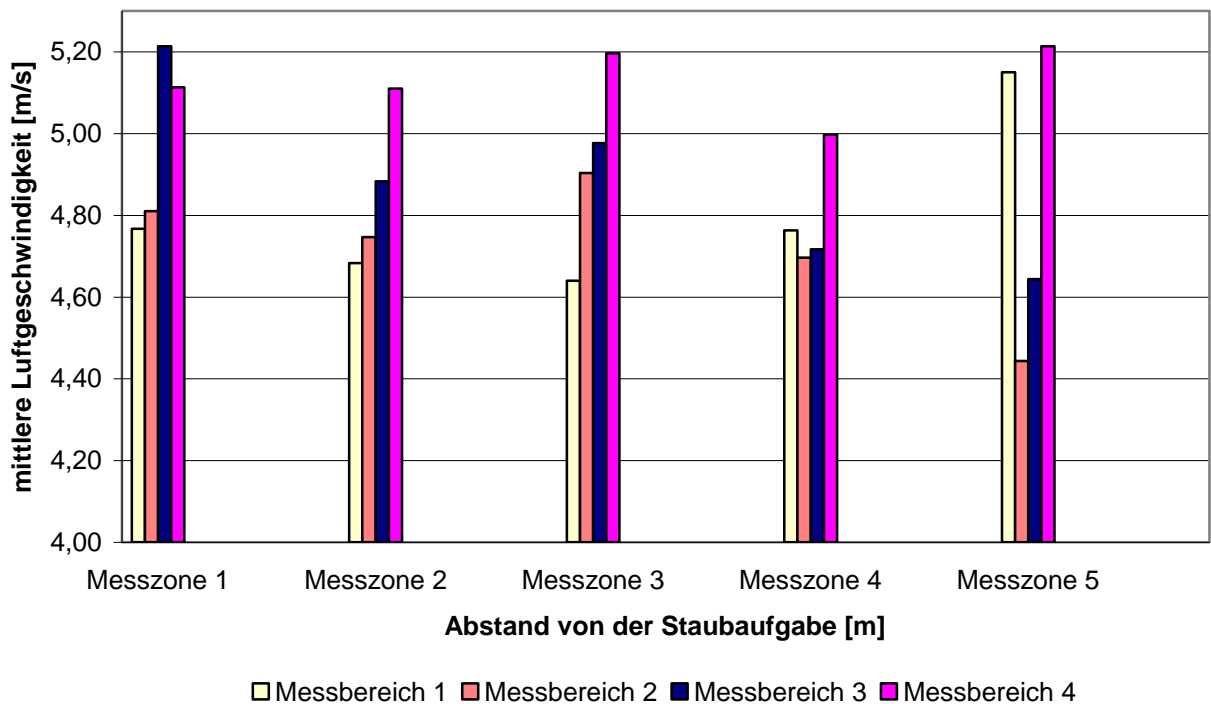


Abbildung 92: Mittlere Luftgeschwindigkeit in Längsrichtung bei 3000 U/min
in den jeweiligen Messzonen

Bildet man aus den Einzelgeschwindigkeiten der Messbereiche eine mittlere Geschwindigkeit, so ergeben sich die in Tabelle 18 dargestellten Werte. Anhand der Standardabweichung, die den Streuwert um die mittlere Geschwindigkeit angibt, zeigt sich auch, dass im Bereich der Messzone 4 die Werte der Geschwindigkeit am wenigsten schwanken, also an dieser Stelle ein weitestgehend homogenes Strömungsprofil vorliegt.

	Messzone 1		Messzone 2		Messzone 3		Messzone 4		Messzone 5	
	0 m		2,5 m		3,5 m		4,5 m		5,5 m	
	M	σ_x	M	σ_x	M	σ_x	M	σ_x	M	σ_x
600 U/min	0,93	0,055	0,93	0,039	0,90	0,030	0,92	0,023	0,91	0,082
2000 U/min	3,24	0,218	3,18	0,099	3,16	0,131	3,10	0,080	3,05	0,457
3000 U/min	4,98	0,221	4,86	0,189	4,93	0,230	4,79	0,138	4,86	0,378

Tabelle 18: Mittelwert (M) und Standardabweichung (σ_x) der Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lüfterdrehzahlen

Weiterhin zeigt sich, dass die Standardabweichung umso größer wird, je höher die Lüfterdrehzahl und damit die Geschwindigkeiten sind. Das bedeutet, dass die Werte stärker vom Mittelwert schwanken und sich damit die Geschwindigkeiten in den Messbereichen stärker unterscheiden. Dies hat keine Auswirkung auf die Wahl der Staubentnahme, ist jedoch bei der Auswertung von Ergebnissen zu berücksichtigen.

Die größeren Schwankungen in den einzelnen Messzonen lassen sich wie folgt erklären. Die Luftgeschwindigkeit im Bereich der Staubaufgabe wird durch die Nähe zu dem Krümmer zwischen oberem und unterem Kanalabschnitt beeinflusst. Selbst bei einer Lüfterdrehzahl bis 600 U/min erkennt man noch direkte Auswirkungen (vgl. Abbildung 90). Die Werte der Messbereiche 1 und 4 sind geringer als die der Bereiche 2 und 3, da die Luftströmung durch den längeren Weg verlangsamt wird. Mit zunehmender Geschwindigkeit nehmen die Messwerte in den Bereichen 3 und 4 die höchsten Werte an. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten sowohl in diesem Bereich als auch bei einem Abstand von 2,5 m, 3,5 m und 5,5 m unregelmäßige

Messwerte aufweisen, die nicht durch die von den Krümmern hervorgerufenen Beeinflussungen der Strömung erklärbar sind.

Die Staubentnahme wird unter den genannten Randbedingungen im Bereich der Messzone 4 bei einem Abstand von 4,5 m angeordnet, da die Geschwindigkeiten in diesem Querschnitt am gleichmäßigsten sind. Damit ist dieser Bereich gemäß DIN EN 13284-1 für die Staubentnahme am sinnvollsten.

Für die isokinetische Staubanalyse wird eine Out-Stack Probennahmeeinrichtung mit beheizbarem Absaugrohr von der Firma Paul Gothe GmbH nach DIN 2066 verwendet (Abbildung 93).



Abbildung 93: Out-Stack Einheit

Für die Messung in der festgelegten Messzone werden vier Messungen in den jeweiligen Messbereichen durchgeführt. Dazu wird ein Teilvolumenstrom aus dem Kanal angesaugt (Abbildung 94).

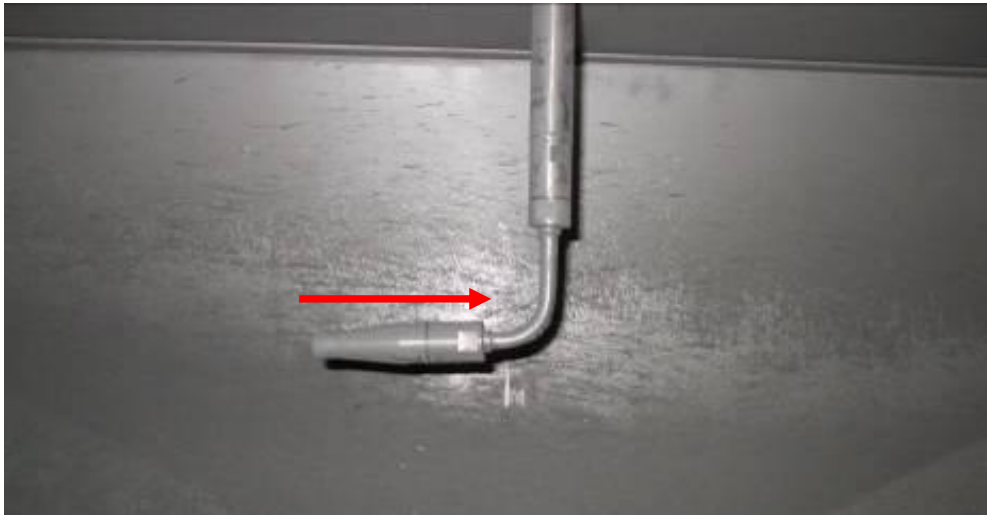


Abbildung 94: Staubentnahmesonde im Staubkanal nach einer Messung
(Pfeil zeigt die Strömungsrichtung an)

Die mit Staub beladene Luft durchströmt einen Mikroglassfilter, der sich am Ende der Messsonde in einem Filterhalter befindet (Abbildung 95).



Abbildung 95: Absaugsonde mit Filterhalter (Kreis) und Planfilterheizung

Die im Teilvolumenstrom befindlichen Staubpartikel werden durch einen Filter (Abbildung 96) zurückgehalten.



Abbildung 96: Filterhalter mit Mikroglassfilter nach einer Messung

Das abgesaugte Gasvolumen des Teilvolumenstroms wird mit einer geeichten Gasuhr der Firma Paul Gothe GmbH ermittelt (Abbildung 97).



Abbildung 97: Gasabsaugung für die Messsonde

Die Filterplatten aus der Staubmesssonde werden entsprechend den Vorgaben der DIN 2066 ausgewertet. Dazu werden die mit Staub beladenen Filterplatten in einem Trockenschrank 1,5 Stunden bei 180°C getrocknet und anschließend in einem Exsikkator wieder abgekühlt. Nach 1,5 Stunden Kühlzeit werden die Filterplatten mit einer Feinwaage der Firma Sartorius vom Typ ME235P (Messgenauigkeit 0,1 mg) gewogen. Die Differenz zu dem Leergewicht der jeweiligen Messschale entspricht der Staubmenge im abgesaugten Teilvolumenstrom. Anhand der ermittelten Staubmenge und der abgesaugten Gasmenge des Teilvolumenstroms wird die Staubbeladung ermittelt. Die Staubbeladung ist dabei ein Maß für den Staubmassenstrom im Verhältnis zu dem abgesaugten Teilvolumenstrom.

Um die Vergleichbarkeit mit realen untertägigen Messungen zu erreichen, ist es möglich, an Stelle der Out-Stack Messsonde ein TBF 50 Gerät der Firma Mollidor und Müller zu verwenden. Die Absaugung des Staubs muss bei diesem gravimetrischen Verfahren zur Seite hin erfolgen, so dass entsprechende Vorrichtungen 4,5 m in Strömungsrichtung hinter der Staubaufgabe eingebaut werden (Abbildung 98).



Abbildung 98: TBF 50 der Firma Mollidor und Müller

Die Luft wird mit einer Geschwindigkeit von rd. 2,5 m/s bzw. mit einem Volumenstrom von 50 l/min mit Hilfe eines Druckluft-Ejektors angesaugt.

Um einen Vergleich der Staubkonzentrationen während der Versuchsreihen zu ermöglichen, werden die Tyndallometer-Versuche durchgeführt. Aus den Erfahrungen der DMT ist bekannt, dass nicht in allen Messbereichen reproduzierbare Ergebnisse vorliegen. Da als primäres Messverfahren eine gravimetrische Messung eingesetzt wird und die Intensitätswerte des Tyndallometers nur in Abhängigkeit zur Gravimetrie einen Staubkonzentrationswert ergeben, gleichen sich etwaige Messfehler wieder aus.

Zur Messung wird das Messgerät an einer Schiene innerhalb des Kanals befestigt (Abbildung 99).

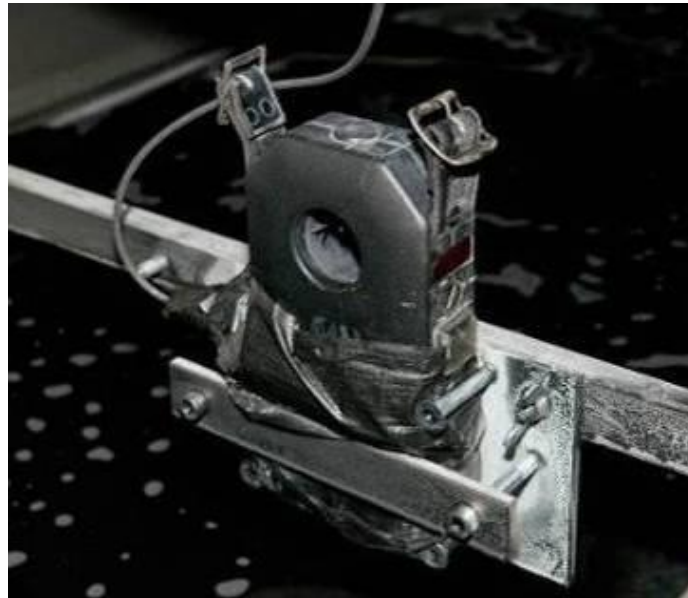


Abbildung 99: Tyndallometer TM digital μP der Firma Hund im Windkanal /6/

Zwischen der gemessenen Lichtintensität und der Konzentration des Staubes wurden die für den Windkanal geltenden Zusammenhänge ermittelt. Bei den Versuchsreihen wird aus Sicherheitsgründen vorwiegend der DIN-Messstaub Schiefermehl verwendet. Vergleichsweise werden wenige Versuche auch mit Kohlenstaub durchgeführt.

Messungen im Versuchskanal mit dem beschriebenen gravimetrischen Messinstrument zeigen einen vergleichbaren Zusammenhang zwischen gravimetrisch ermittelter Staubkonzentration und den entsprechenden Lichtintensitätswerten (Abbildung

100 f.) wie es Breuer und Hesse in ihren Untersuchungen ermittelten.

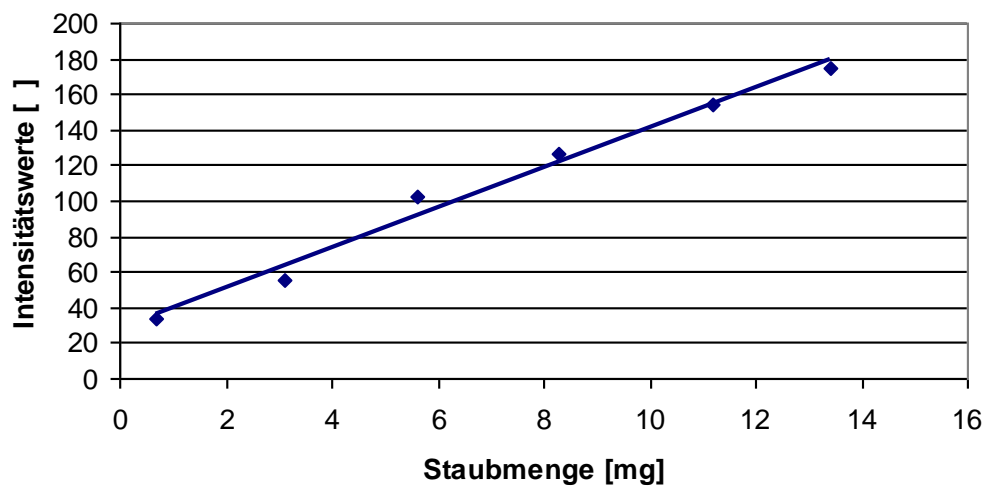


Abbildung 100: Zusammenhang zwischen dem Intensitätswert und der Staubkonzentration (Schiefermehl) im Versuchskanal bei einer Lüfterdrehzahl von 600 U/min

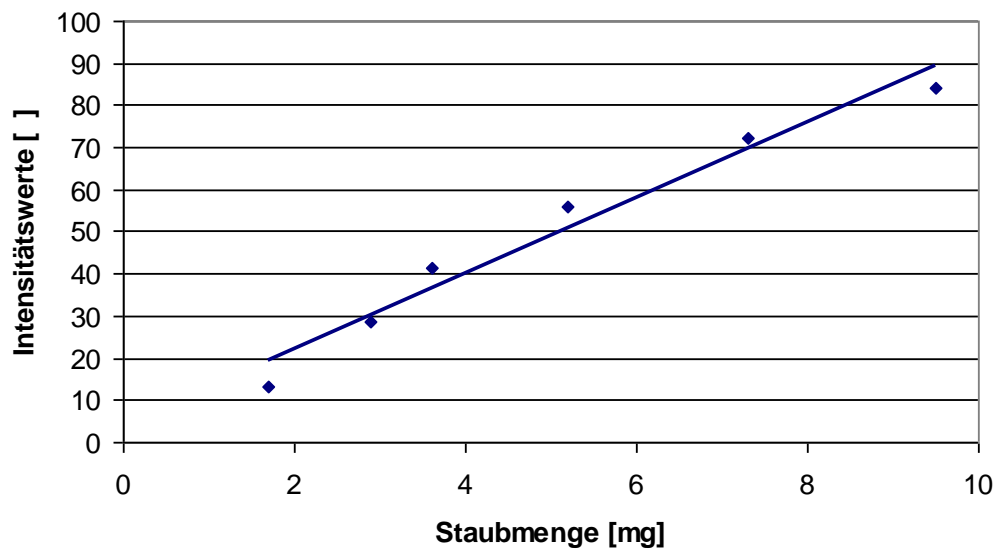


Abbildung 101: Zusammenhang zwischen dem Intensitätswert und der Staubkonzentration (Kohlenstaub) im Versuchskanal bei einer Lüfterdrehzahl von 600 U/min

Der funktionale Zusammenhang erlaubt es, im Folgenden die tyndallometrischen Werte als Vergleichsbasis heranzuziehen.

9.3.3 Ermittlung der Umgebungseinflüsse

Der Windkanal wird mit einer Messtechnik gemäß DIN 2066 (Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit) ausgestattet.

Die Luftgeschwindigkeiten werden mittels eines S-Pitot-Rohrs mit dem Druckmessgerät vom Typ HMG 03 der Firma Paul Gothe GmbH, Bochum, sowie mit Hilfe eines Messkreuzes der Firma Airflow ermittelt.

Das S-Pitot-Rohr misst im Zentrum des Kanalquerschnitts den dynamischen Druck punktuell (Abbildung 102 f.); mit einer Umrechnungsformel lässt sich daraus die Geschwindigkeit berechnen.

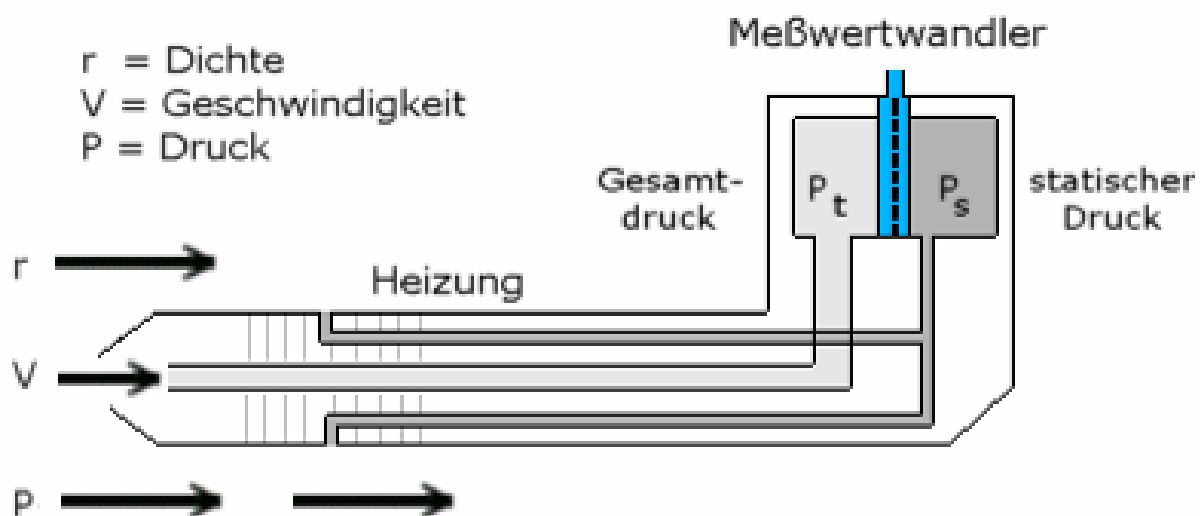


Abbildung 102: Messprinzip S-Pitot Rohr

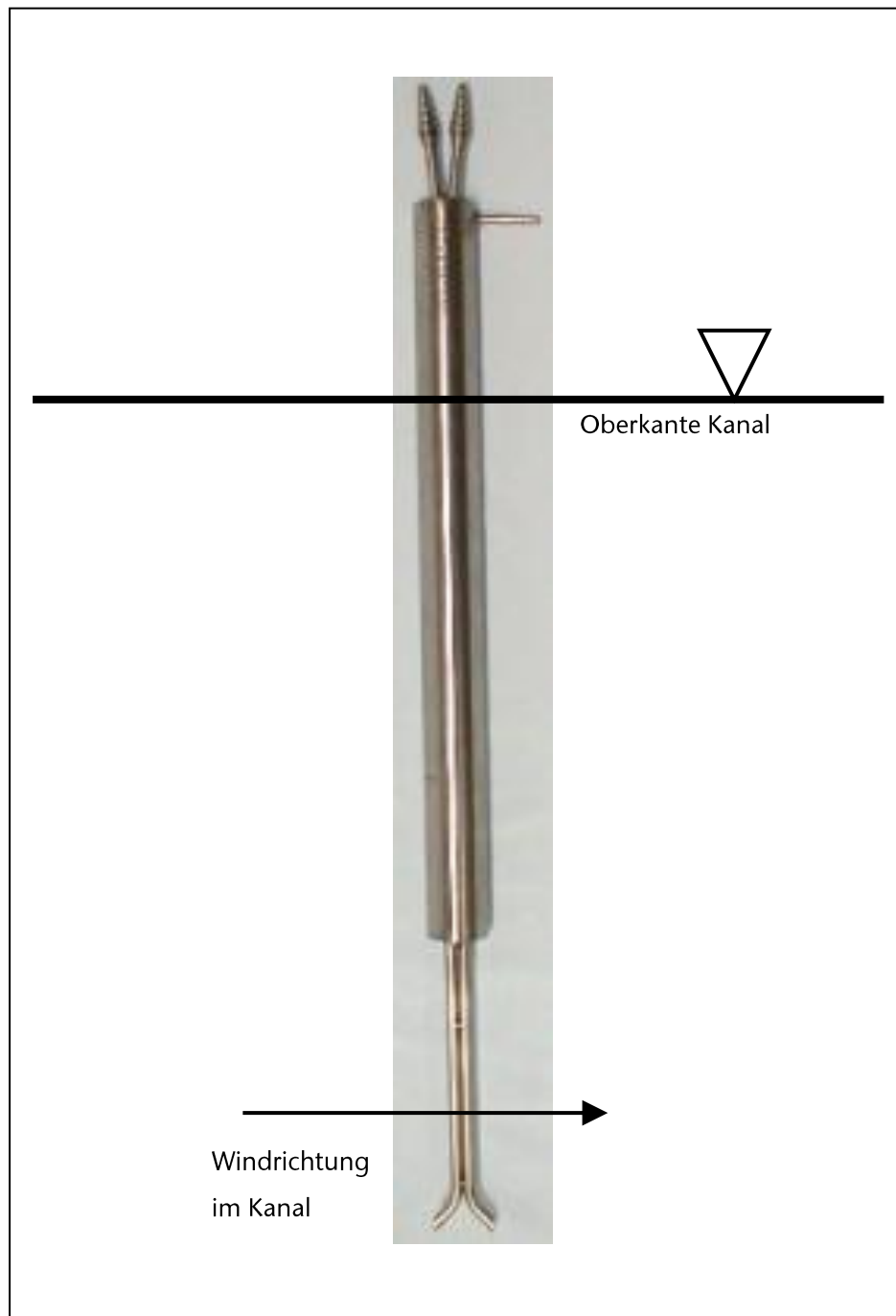


Abbildung 103: S-Pitot Rohr der Firma Paul Gothe

Das Messkreuz der Firma Airflow dient im Gegensatz zum S-Pitot Rohr zur Ermittlung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Das Messinstrument besteht eingangsseitig aus zwei gekreuzten Rohren zur Aufnahme des Staudrucks und des Bezugsdrucks (Abbildung 104).



Abbildung 104: Messkreuz im Kanal

Die Rohre sind dabei so perforiert, dass an beiden Anschlussstutzen ein über den gegebenen Querschnitt des Luftstroms gemittelter Wert, der Differenzdruck, gemessen wird. Da dieser in einem direkten Verhältnis zur Strömungsgeschwindigkeit steht, lässt sich damit auch die zugehörige mittlere Strömungsgeschwindigkeit ermitteln. Für die Registrierung des Messdrucks wird ein Feinmanometer der Firma Greisinger verwendet (Abbildung 105).

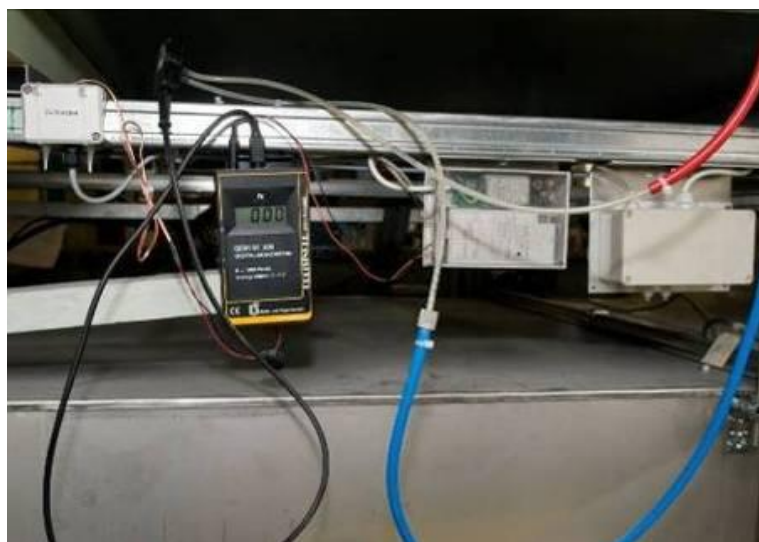


Abbildung 105: Feinmanometer

Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe eines kombinierten Temperatur-Feuchte-Messfühlers vom Typ DK-RF 400 der Firma Driesen und Kern GmbH (Abbildung 106).



Abbildung 106: Feuchte-Tempersensor

Der barometrische Druck im Kanal wird über einen Druckmesswertgeber der Firma Driesen und Kern ermittelt.

Die jeweiligen Positionen der Messgeräte sind in der folgenden Abbildung dargestellt (Abbildung 107).

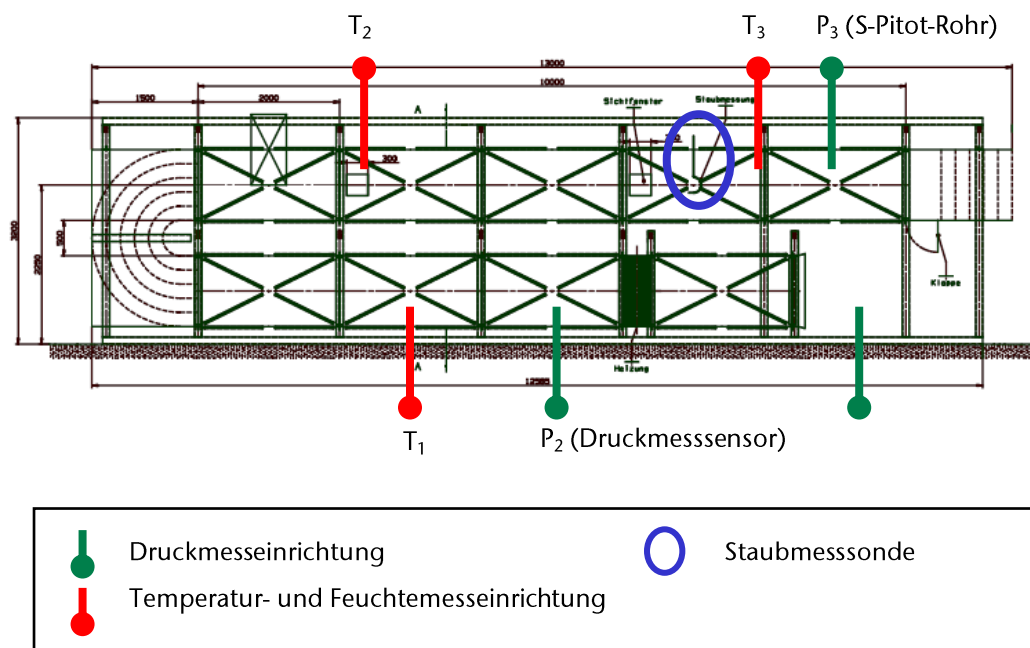


Abbildung 107: Übersicht über die eingesetzten Messgeräte

Mit einem nicht stationären Hitzdraht-Anemometer vom Typ 43-2 der Firma Testo AG, Lenzkirch, lassen sich zusätzlich an verschiedenen Stellen im Kanal Werte für Temperatur, Druck und Geschwindigkeit entnehmen. Bei einem weiteren Messgerät der Firma Testo AG, Lenzkirch, ist neben einem Flügelradanemometer zusätzlich eine Messsonde zur Ermittlung der Luftfeuchtigkeit integriert.

Die Luftgeschwindigkeit lässt sich über das S-Pitot Rohr und das Wetterkreuz ermitteln.

9.4 Datenerfassung

Alle Messdaten werden über elektrische Signale an einen Messrechner übersendet (Abbildung 108).



Abbildung 108: Datenerfassungsrechner

Das Messwerterfassungs-Programm Daisy Lab erfasst die Signale und wandelt diese entsprechend der hinterlegten Umrechnungsfaktoren in die jeweilige Messgröße um. Für die Umrechnung wird ein Schaltbild programmiert, so dass das Programm die funktionalen Zusammenhänge darstellen kann (Abbildung 109). Während der Messung können die Messdaten abgelesen werden, wodurch etwaige Fehler unmittelbar erkannt werden (Abbildung 110).

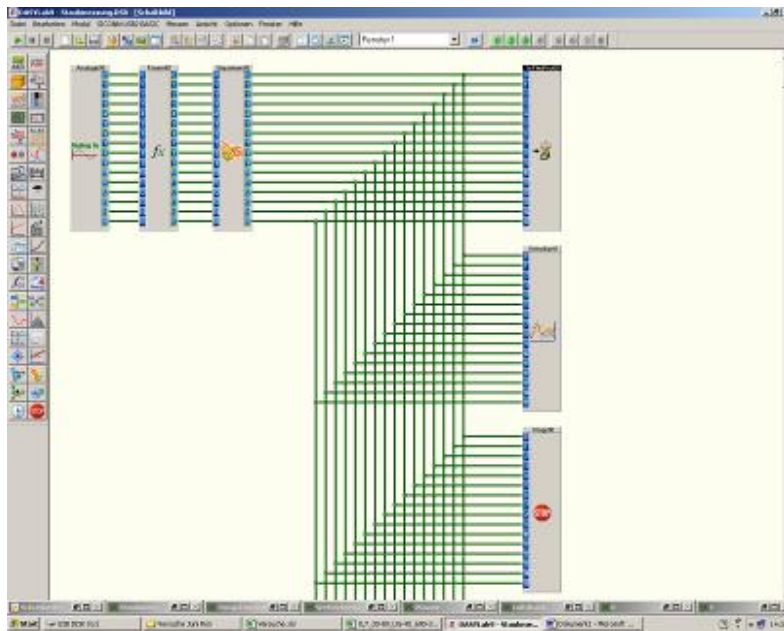


Abbildung 109: Daisy Lab Schaltbild

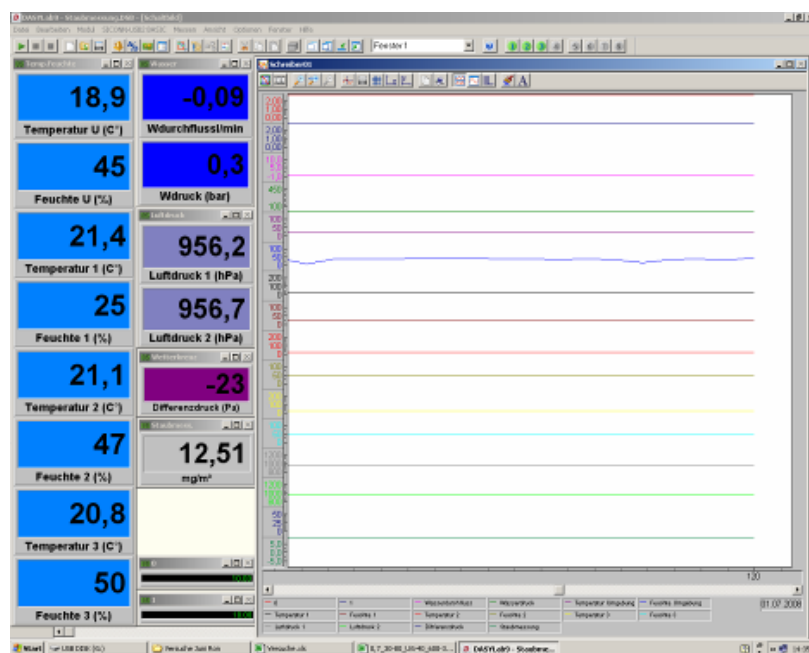


Abbildung 110: Daisy Lab Messerfassung

9.5 Bewertung des Versuchskanals

Bei den Referenzversuchen (vgl. Kapitel 8) gab es neben den In-Situ Versuchen im Wesentlichen drei Versuchsstände:

1. Klimatisierter Staubkanal
2. Strömungskanal des Staubbekämpfungs- Versuchsfelds
3. Schrämwälzenversuchsstand

Da die Versuchsstände in der dargestellten Form nicht mehr existieren, können keine Aussagen darüber getroffen werden, ob sie hätten nachgerüstet werden können. Die Bewertung muss daher anhand der in der Literatur dargestellten Ist-Zustände der Versuchsaufbauten und Ausrüstungen vorgenommen werden (vgl. Seite 69 f.).

Wie bereits dargestellt, sollen zur Nachbildung einer Bedüsungseinrichtung unterschiedliche Staubaufgaben realisiert werden:

1. Staubentstehung bei der schneidenden Gewinnung
2. Staubentstehung bei der schälenden Gewinnung
3. Staubentstehung an Übergaben

Die Bedüsungseinrichtung muss entsprechend folgende Situationen darstellen können:

1. Bedüsung bei der schneidenden Gewinnung
 - 1.1 Hochdruckschneidspurbedüsung
 - 1.2 Ejektorbedüsung
2. Bedüsung bei der schälenden Gewinnung
3. Bedüsung an Übergaben
4. Weitere Bedüsungstechnik (z. B. Wasser-Luft-Düsen)

Darüber hinaus müssen unterschiedliche Betriebsparameter der jeweiligen Düsen und die Auswirkungen weiterer Düsen abzubilden sein. Hinsichtlich der Umgebungseinflüsse müssen die klimatischen und wettertechnischen Bedingungen (Lufttemperatur, -feuchte und -geschwindigkeit) umsetzbar sein. In Tabelle 19 sind die notwendigen Komponenten der Staubentstehung und der Bedüsungseinrichtung sowie die mindestens abzubildenden Umgebungseinflüsse den jeweiligen Versuchs-

ständen gegenübergestellt.

	Klimatisierter Staubkanal	Strömungskanal des Staubbekämpfung- Versuchsfelds	Schrägwalzenversuchs- stand	Versuchsstand TU Clausthal
Staubentstehung				
Arten der Staubentstehung				
schneidende Gewinnung	-	+	+	+
schälende Gewinnung	+	+	-	+
Übergabenbedüsung	+	+	-	+
Regulierbarkeit der Staubmenge	(+)	+	+	+
Bedüsungseinrichtung				
Arten der Bedüsung				
schneidende Gewinnung		+	+	+
schälende Gewinnung		+	-	+
Übergabenbedüsung		+	-	+
Nachbarschaftseffekt	-	-	-	+
Regulierbarkeit des Bedüsungswasserdrucks	+	+	+	+
Regulierbarkeit der Bedüsungswassertemperatur	+	-	-	+
Auswirkungen von Tensiden	(+)	+	(+)	+
Umgebungseinflüsse				
künstliche Wärmequellen				
Gebirgswärme und Wärme durch das Fördergut	+	-	-	+
Wärme durch das Werkzeug	-	-	-	+
Wärmeaustausch durch das Was- ser	+	-	-	+
künstliche Luftbewegung	+	+	+	+
künstliche Luftfeuchtigkeit	+/-	-	-	+/-

- + durchgeführt
- +/- möglich , aber fehlerbehaftet
- (+) möglich, aber nicht durchgeführt
- nicht möglich

Tabelle 19: Gegenüberstellung der Versuchsstände

Anhand der Gegenüberstellung wird deutlich, dass das Gesamtsystem Bedüsung mit den dargestellten Versuchsaufbauten und Messausrüstungen nicht abgebildet werden kann. Bei den Referenzversuchen werden in der Regel nur entweder die Staubentstehung, die Bedüsungseinrichtung oder die Umgebungseinflüsse betrachtet.

Beim Versuchsstand der TU Clausthal lassen sich nunmehr alle Bereiche der bisherigen Versuchsaufbauten und damit die wesentlichen Komponenten und Umgebungseinflüsse darstellen. Bei den Umgebungseinflüssen kann zusätzlich zu den Möglichkeiten der Referenzversuche auch die Wärmequelle „Werkzeug“ berücksichtigt werden. In Zusammenhang mit der Laserbeugung lässt sich somit die rechnerisch nachgewiesene Minimierung der Tropfen durch Verdunstung messtechnisch nachweisen.

Hinsichtlich der Messausstattung hat der neue Versuchsstand erhebliche Vorteile (Tabelle 20). Die Grundausrüstung, wie Messung der Feuchte, Temperatur etc., ist vergleichbar mit denen der Referenzversuche. Die Staubmessung kann sowohl gravimetrisch als auch lichtoptisch erfolgen. Dabei können, wie bei Versuchsständen dieser Art üblich, isokinetische Staubmesssonden, aber auch die im Steinkohlenbergbau verwendeten Messgeräte TBF 50 und MPG2 (vgl. Kapitel 3) angewendet werden. Durch vergleichbare Messtechnik werden mögliche Fehlereinflüsse bei einer Übertragung der Messergebnisse auf die Wirklichkeit minimiert.

Der Versuchsstand der TU Clausthal zeichnet sich weiterhin dadurch aus, dass der Ort der Staubentnahme nicht nur anhand von Erfahrungswerten festgelegt, sondern Bereiche mit gleichmäßigen Strömungsverhältnissen ausgewählt wurden.

	Klimatisierter Staubka- nal	Strömungskanal des Staubbekämpfung - Versuchsfelds	Schrägwalzenver- suchsstand	Versuchsstand TU Clausthal
Staubmenge				
Gravimetrie				
Messsonde	+	+	+	+
MPG 2	-	-	-	+
TBF 50	-	-	-	+
Tyndallometer	-	+	+	+
Bedüsungseinrichtung				
Laserbeugung	-	-	-	+
Phasen-Doppler-Anometer	-	+	-	-
Umgebungseinflüsse				
Umgebungstemperatur	+	+	-	+
Temperatur des Wassers	+	-	-	+
Luftbewegung	+	+	+	+
Luftfeuchtigkeit	-	+	-	+

Tabelle 20: Messausrüstung der Versuchsstände

Entscheidend für die Untersuchung von Bedüsungseinrichtungen ist, dass unter gleichen Umgebungseinflüssen sowohl die Tropfen- als auch die Staubanlyse durchgeführt werden kann. Auf diese Weise lassen sich Ursache (Umgebungseinflüsse und Veränderung der Tropfengröße) und Wirkung einer Bedüsungseinrichtung optimal bewerten. Diese Möglichkeit ist mit verschiedenen Messinstrumenten an dem aktuellen Versuchsstand der TU Clausthal möglich. Dabei lassen sich sowohl Tropfengrößen und Staubkonzentrationen ermitteln als auch die Partikelgrößen des Aerosols aus Staubpartikeln und Wassertropfen.

Von Nachteil ist am Versuchsstand der TU Clausthal die Tatsache, dass die Luftfeuchtigkeit wie beim „klimatisierten Staubkanal“ nicht konstant abgebildet werden kann, denn die angesaugte Luft kann nicht ausreichend genug befeuchtet werden. Dadurch lassen sich experimentell keine eindeutigen quantitativen Aussagen zu der Veränderung der Luftfeuchtigkeit geben.

10 Untersuchung wesentlicher Einflussfaktoren

Bedüsungseinrichtungen lassen sich wie beschrieben durch verschiedene Einflussfaktoren optimieren. Bisher wurden in den Referenzversuchen (vgl. Kapitel 7) nur die Ergebnisse der Staubreduzierung auf Basis eines Wasserdrucks bzw. Volumensstroms betrachtet. Die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren mit einer Betrachtung der möglichen Wechselwirkungen wurden in den Referenzversuchen nicht vorgenommen.

Im Folgenden sollen am Beispiel der schneidenden Gewinnung wesentliche Einflussfaktoren untersucht und deren Wechselwirkungen bewertet werden. Dabei soll nicht die quantitative Beurteilung der Staubreduzierung im Vordergrund stehen, sondern deren funktionale Zusammenhänge.

Der Faktor Düsentechnik ist kein Bestandteil dieser Untersuchung, da der Einsatz alternativer Düsentechnik wie Wassernebeldüsen für die schneidende Gewinnung im Rahmen anderer Forschungsvorhaben untersucht wird (vgl. u. a. Ren/52/). Es werden hier nur Einstoffdüsen der Walzenbedüsung vom Typ Vollkegelstrahldüse System Hochdruckschneidspurbedüsung betrachtet. Die Betriebsparameter Volumensstrom und Tropfengröße werden im Rahmen eines Vergleichs zwischen der derzeit verwendeten Düse mit 0,6 mm Durchmesser und einer baugleichen Düse mit 0,7 mm dargestellt. Dies erfolgt im Hinblick auf aktuelle Untersuchungen zur Optimierung bestehender Walzenbedüsungssysteme. Betriebliche Erfahrungen zeigen, dass die 0,7 mm Düsen bessere Staubbindeigenschaften und darüber hinaus auch technische Vorteile (u. a. weniger Verstopfungen) haben. Der experimentelle Nachweis ist Bestandteil dieser Untersuchung.

Der Betriebsparameter „Stoffeigenschaften“, die äußeren Einflussfaktoren und Tenside werden nur in Bezug auf die 0,7 mm Düse betrachtet.

Da in Kapitel 9.3.2 nachgewiesen wird, dass es einen funktionalen Zusammenhang zwischen der gravimetrischen und der tyndallometrischen Messmethode gibt, werden die folgenden Staubmessungen nur mit einem Tyndallometer durchgeführt. Das Tyndallometer ermittelt aus dem reflektierten Licht in seiner Messkammer die Konzentration an Feinstaub und gibt diese als sogenannten Intensitätswert an. Der Wert ist dimensionslos. Da bei diesen Untersuchungen nicht der quantitative Zusammenhang im Vordergrund steht, wird keine Umrechnung der ausgegebenen Werte in Gewichtseinheiten bzw. Staubbeladung (Gewicht je Volumenstrom) vorgenommen.

10.1 Einflussfaktor Betriebsparameter

10.1.1 Wasserdruck

Durch den Wasserdruck lassen sich der Volumenstrom, die Geschwindigkeit der Flüssigkeit und die Tropfengröße verändern. Die Auswirkungen des Wasserdrucks auf die Staubreduzierung können daher nur indirekt und in Zusammenhang mit den jeweiligen Einflussgrößen betrachtet werden.

10.1.2 Volumenstrom

Der Volumenstrom bzw. die daraus resultierende Wassermenge stellt - wie aus bisherigen Untersuchungen bekannt - ein wichtiges Kriterium für die Staubbindeeffektivität dar. Allgemein lässt sich festhalten: Je mehr Wasser vorhanden ist, desto mehr Staub kann gebunden werden. Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten nach Bernoulli und der Kontinuitätsgleichung gibt es die Möglichkeit den Volumenstrom entweder über den Wasserdruck oder den Düsendurchmesser zu erhöhen (vgl. auch Kapitel 5.2.1).

10.1.2.1 Druckbedingte Änderung

Betrachtet man die druckbedingte Veränderung des Volumenstroms, so ist zu erkennen, dass die Steigerung des Volumenstroms über den Druck bei beiden

Durchmessern nicht konstant verläuft. Bis etwa 30 bar nimmt die Flüssigkeitsmenge stark zu, anschließend kommt es zu einer geringeren nahezu linearen Zunahme (Abbildung 111).

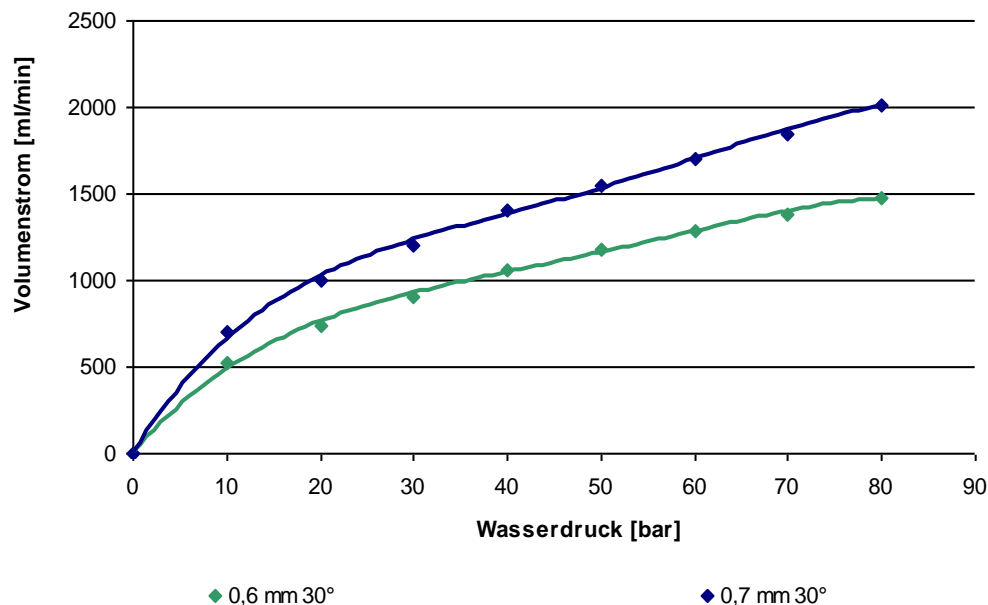


Abbildung 111: Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Wasserdruck mit unterschiedlichen Düsen bei der Hochdruckschneidspurbedüsung

Um den Einfluss der druckbedingten Zunahme des Volumenstroms hinsichtlich der Staubbildung zu beurteilen, wurde mit den Vollkegelstrahldüsen (Durchmesser 0,6 mm und 0,7 mm) die Staubbildung in dem entsprechenden Druckbereich von 30 bis 80 bar ermittelt. Die Staubbildung mit dem Tyndallometer ergibt bei einer Volumenstromzunahme von insgesamt 580 l/min eine Staubreduzierung von insgesamt 21% bei der 0,6 mm Düse. Bei der 0,7 mm Düse wird mit einer Volumenstromzunahme von 810 l/min eine Reduzierung um 18 % erreicht (Abbildung 112).

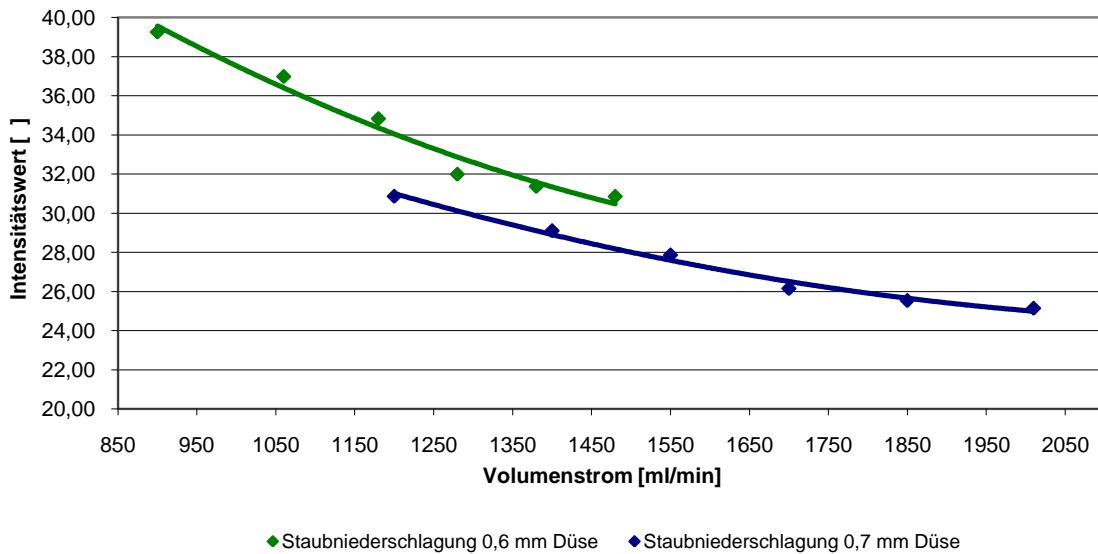


Abbildung 112: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Volumenstrom

Die Untersuchung zeigt, dass der Zusammenhang zwischen Abnahme der Intensitätswerte und Zunahme des Volumenstroms nicht linear verläuft. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass die druckbedingte Änderung des Volumenstroms in keinem proportionalen Zusammenhang mit der Änderung der Intensitätswerte zu bringen ist. Es zeigt sich, dass sich trotz teilweise konstanter Zunahme des Volumenstroms die Intensitätswerte nicht proportional dazu verringern. So reduziert sich beispielsweise bei der 0,7 mm Düse der Intensitätswert im Bereich von 50 auf 60 bar um 1,7 und in der darauf folgenden Druckstufe nur noch um 0,7, obwohl der Volumenstrom jeweils um 150 l/min zunimmt.

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Volumenstrom der 0,6 mm Düse [l/min]	900	1060	1180	1280	1380	1480
Intensitätswert der 0,6 mm Düse []	39,3	37	34,8	32	31,4	30,9

Tabelle 21: Veränderung der Intensitätswerte und des Volumenstroms bei der Düse mit 0,6 mm Durchmesser

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Volumenstrom der 0,7 mm Düse [l/min]	1200	1400	1550	1700	1850	2010
Intensitätswert der 0,7 mm Düse []	30,9	29,4	27,9	26,2	25,5	25,1

Tabelle 22: Veränderung der Intensitätswerte und des Volumenstroms bei der Düse mit 0,7 mm Durchmesser

Insgesamt lässt sich anhand dieser Ergebnisse festhalten, dass nicht der Betrag der druckbedingten Änderung des Volumenstroms, sondern die absolute Menge an Wasser das Ergebnis der Staubreduzierung beeinflusst.

10.1.2.2 Änderung des Düsendurchmessers

Durch die Veränderung des Düsendurchmessers wird eine Volumenstromzunahme hervorgerufen. Dabei nimmt der Differenzbetrag des Volumenstroms zwischen der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse mit steigendem Druck stetig zu (vgl. Abbildung 111). Bei der 0,6 mm Düse kommt es zu einer Volumenstromerhöhung von 580 ml/min und bei der 0,7 mm Düse nimmt der Volumenstrom sogar um 810 ml/min zu. Allerdings lässt sich feststellen, dass das Verhältnis der Volumenstromwerte der 0,6 mm zu denen der 0,7 mm Düse annähernd konstant, also proportional, ist (Tabelle 23).

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Volumenstrom [ml/min] der 0,6 mm Düse	900	1060	1180	1280	1380	1480
Volumenstrom [ml/min] der 0,7 mm Düse	1200	1400	1550	1700	1850	2010
Differenzbetrag Volumenstrom zwischen 0,6 mm und 0,7 mm Düse [ml/min]	300	340	370	420	470	530
Verhältnis Volumenstrom der 0,6 zu der 0,7 mm Düse []	0,75	0,76	0,76	0,75	0,75	0,74

Tabelle 23: Veränderung des Volumenstroms mit unterschiedlichem Düsendurchmesser

Die durch den größeren Durchmesser hervorgerufene Volumenstromerhöhung spiegelt sich auch in den Intensitätswerten bzw. in der verbesserten Reduzierung des Staubgehalts wieder. Bei der 0,6 mm Düse reduziert sich der Intensitätswert um den Faktor 8,4 bei der 0,7 mm Düse allerdings nur um den Faktor 5,8. Je größer der Volumenstrom, desto größer ist die erreichbare Reduzierung. Vergleicht man die beiden Düsengrößen, so zeigt sich, dass die Staubintensität der 0,7 mm Düse von vornherein kleiner ist (vgl. Abbildung 111 und Abbildung 113). Dies liegt an dem höheren Volumenstrom, der zur Staubbildung zur Verfügung steht.

Die Höhe der erreichbaren Staubreduzierung wird also durch die absolute Wassermenge bestimmt.

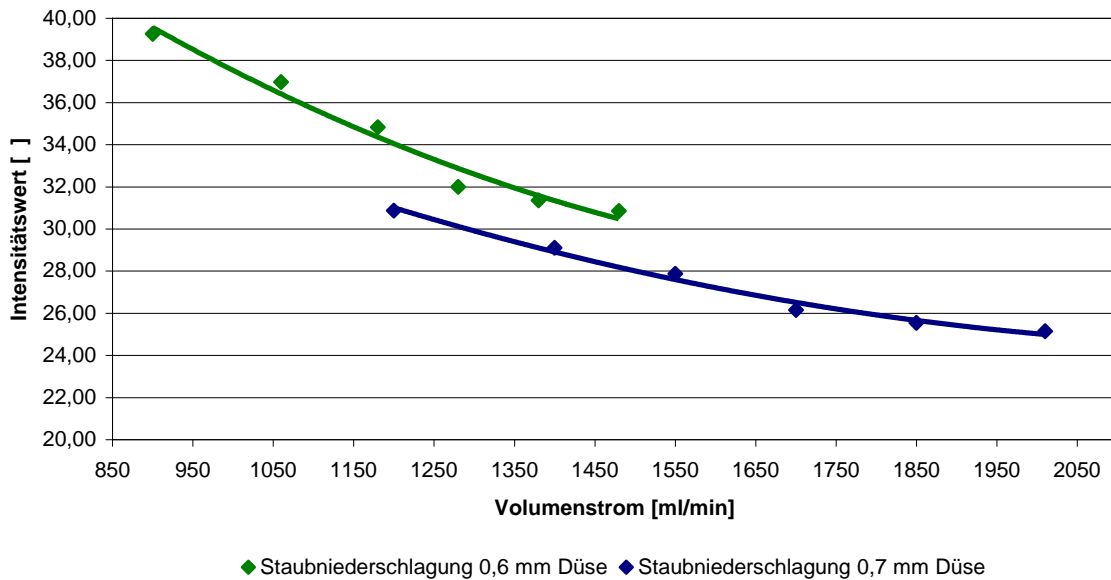


Abbildung 113: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Volumenstrom

Es stellt sich nunmehr die Frage, ob zwischen der durch den Düsendurchmesser verursachten Volumenstromerhöhung und der Reduzierung der Staubintensität ein direkter Zusammenhang besteht. Die Versuche zeigen, dass sich der Differenzbetrag der Intensitätswerte mit steigendem Druck reduziert, wobei ab 60 bar der Reduzierungsbetrag konstant bleibt (Tabelle 24).

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Intensitätswert der 0,6 mm Düse []	39,3	37,0	34,8	32,0	31,4	30,9
Intensitätswert der 0,7 mm Düse []	30,9	29,4	27,9	26,2	25,5	25,1
Differenzbetrag Intensitätswert zwischen 0,6 mm und 0,7 mm Düse [ml/min]	- 8,4	- 7,6	- 7,0	- 5,8	- 5,8	- 5,7
Verhältnis Intensitätswert der 0,6 zu der 0,7 mm Düse []	- 0,21	- 0,21	- 0,20	- 0,18	- 0,19	- 0,19

Tabelle 24: Veränderung der Intensitätswerte mit unterschiedlichem Düsendurchmesser

Vergleicht man dazu die Differenzbeträge der Volumenströme, so zeigt sich, dass trotz steigender Volumenstromwerte die Reduzierung der Intensitätswerte abnimmt.

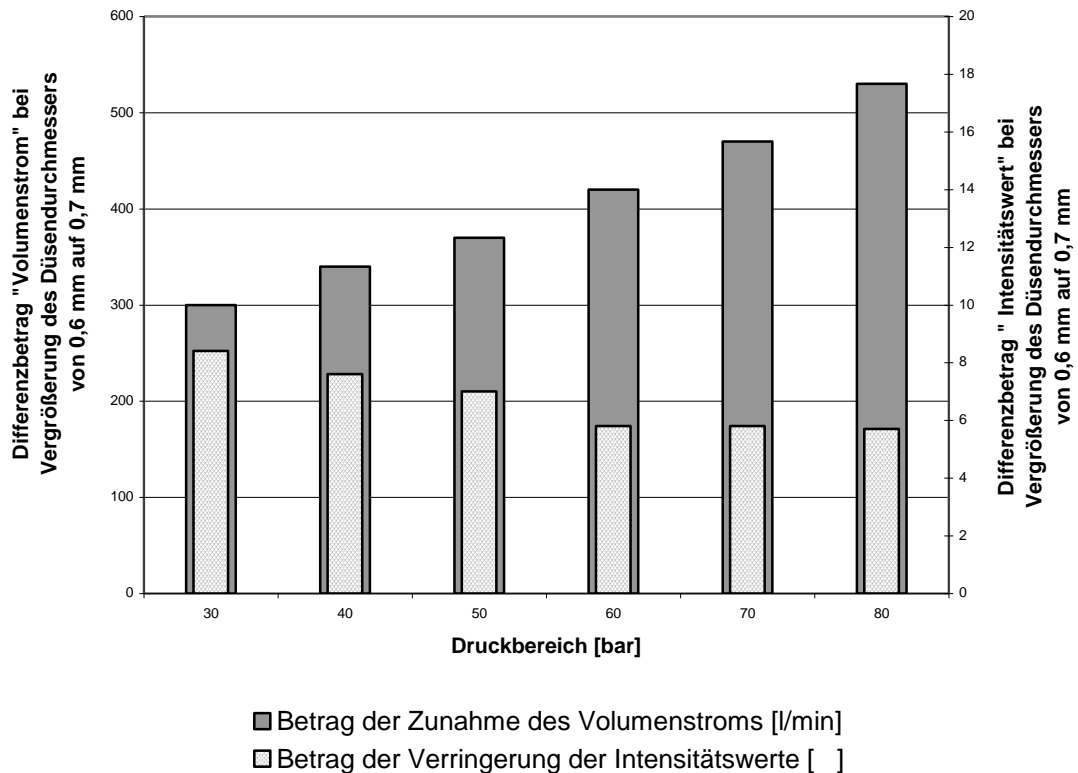


Abbildung 114: Differenzbetrag des Volumenstroms und der Intensitätswerte bei Vergrößerung des Düsendurchmessers von 0,6 auf 0,7 mm

Damit lässt sich feststellen, dass die Verringerung der Intensitätswerte nicht proportional zu der durch die Änderung des Düsendurchmessers hervorgerufenen Zunahme des Volumenstroms ist. Somit wird der Betrag der Staubreduzierung nicht durch die Änderung des Volumenstroms bestimmt. Dies bestätigt die Erkenntnis, dass in erster Linie die absolute Menge an Wasser für die Höhe der Staubreduzierung bzw. Effektivität und nicht der Betrag der Änderung des Volumenstroms entscheidend ist.

10.1.3 Tropfengröße

Wie beim Volumenstrom lässt sich bei der Tropfengröße eine druckbedingte und eine durch die Variation des Düsendurchmessers hervorgerufene Veränderung des Tropfendurchmessers unterscheiden.

10.1.3.1 Druckbedingte Änderung

Allgemein zeigt sich, dass die Erhöhung des Wasserdrucks zu einer kontinuierlichen nicht linearen Verringerung des Tropfendurchmessers führt. Mit zunehmendem Druck verringert sich die Reduzierung der Tropfengröße. Die Ausgangstropfengröße bei 30 bar wird dabei durch den Düsendurchmesser bestimmt. Ausgehend von diesem Wert kommt es zu einer nahezu gleichmäßigen Änderung der Tropfengröße. Entsprechend laufen die Kurven der 0,6 und der 0,7 mm Düse parallel. Die Begründung liegt im Tropfenbildungsprozess; je nach Druck bzw. der daraus resultierenden Geschwindigkeit werden die Tropfen mehr oder weniger zerstäubt (vgl. Kapitel 4.1).

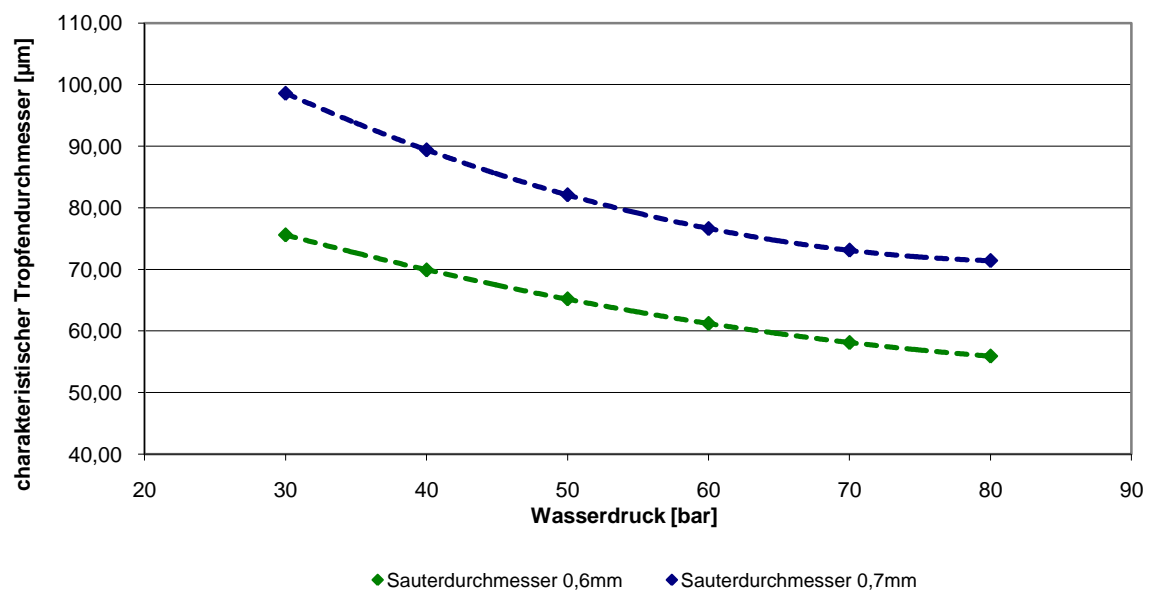


Abbildung 115: Zusammenhang zwischen charakteristischem Tropfendurchmesser und Wasserdruck

In dem betrachteten Druckbereich werden die folgenden Intensitätswerte sowie der Sauterdurchmesser als charakteristischer Tropfendurchmesser erreicht (Tabelle 23 und Tabelle 24). Dabei lässt sich erkennen, dass sich das Verhältnis Intensitätswert und Sauterdurchmesser in den jeweiligen Druckbereichen annähernd proportional zueinander verhält.

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Intensitätswert der 0,6 mm Düse []	39,3	37,0	34,8	32,0	31,4	30,9
Sauterdurchmesser der 0,6 mm Düse [μm]	75,6	69,9	65,2	61,2	58,1	55,9
Faktor Intensitätswert zu Sauterdurchmesser	0,31	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35

Tabelle 25: Veränderung der Intensitätswerte und des Sauterdurchmessers bei der Düse mit 0,6 mm Durchmesser

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Intensitätswert der 0,7 mm Düse []	30,9	29,4	27,9	26,2	25,5	25,1
Sauterdurchmesser der 0,7 mm Düse [μm]	98,6	89,4	82,1	76,6	73,1	71,4
Faktor Intensitätswert zu Sauterdurchmesser	0,52	0,53	0,53	0,52	0,54	0,55

Tabelle 26: Veränderung der Intensitätswerte und des Sauterdurchmessers bei der Düse mit 0,7 mm Durchmesser

Der Faktor Intensitätswert zu Sauterdurchmesser ist abhängig von dem Düsendurchmesser. Bei der 0,6 mm Düse liegt der Faktor im Mittel bei 0,34 und bei der 0,7 mm Düse bei 0,53. Die Standardabweichung liegt bei 1 %.

Stellt man den entsprechenden Bereich von 30 bis 80 bar grafisch dar¹ (Abbildung 116), so zeigt sich dies auch anhand der unterschiedlichen Kurvenverläufe.

¹ Zur besseren Vergleichbarkeit mit Abbildung 115 wurde der charakteristische Tropfendurchmesser entsprechend seinem Verhalten mit zunehmendem Druck in umgekehrter Reihenfolge, also abnehmend dargestellt.

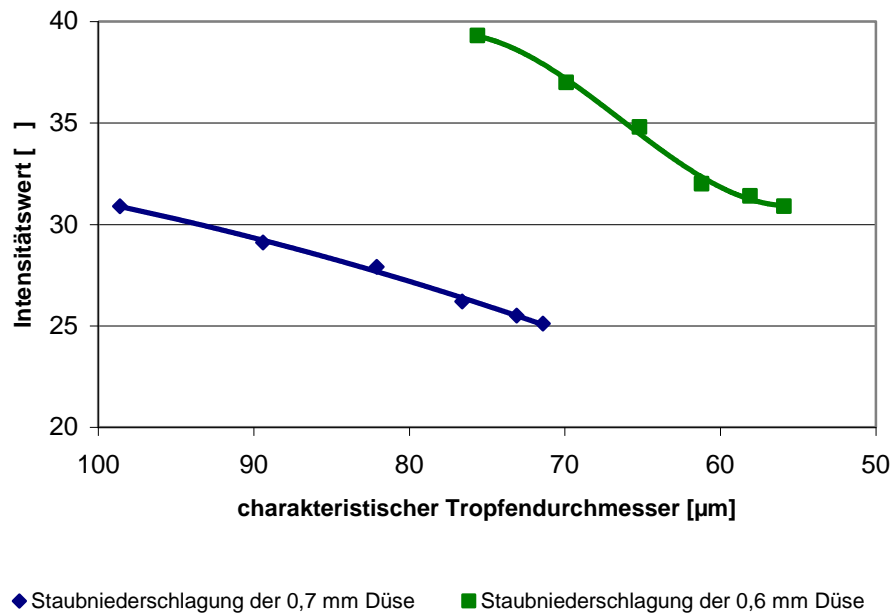


Abbildung 116: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und charakteristischem Tropfendurchmesser der 0,6 mm und 0,7 mm Düse

Die Intensitätswerte bei der 0,6 mm Düse nehmen zunächst stark ab. Bei einem Tropfendurchmesser von kleiner als 60 μm verringert sich jedoch die Reduzierungsrate. Es ist anzunehmen, dass das Tropfenkollektiv so fein wird, so dass ein Teil der Tropfen durch die allgemeine Luftströmung abgelenkt wird und für die eigentliche Staubbindung somit nicht mehr zur Verfügung steht.

Bei der 0,7 mm Düse verläuft die Kurve der Staubreduzierung kontinuierlicher und mit einer geringeren Steigung als bei der 0,6 mm Düse. Die kontinuierliche Reduzierung ist auf den stabilen Sprühstrahl zurückzuführen. Die Tropfen sind allgemein größer und entsprechend weniger driften sie ab und stehen für die Staubbindung zur Verfügung.

Die geringere Steigung der 0,7 mm Düse zeigt an, dass das größere Tropfenspektrum bei der 0,7 mm Düse in dem betrachteten Druckbereich insgesamt weniger Staub bindet: Die 0,6 mm Düse erreicht mit einer Tropfenverkleinerung von insgesamt 27 % eine Reduzierung des Intensitätswerts um 25 %. In dem gleichen Druckbereich erreicht die 0,7 mm Düse bei einer Verkleinerung der Tropfen um 28 % nur

eine Reduzierung um 18 %. Zu begründen ist dies mit der Ausgangstropfengröße; die Tropfen der 0,6 mm Düse sind bei gleichem Druck immer kleiner als die der 0,7 mm Düse (vgl. Abbildung 115) und dadurch lässt sich der Staub besser binden.

Für die druckbedingte Änderung der Tropfengröße lässt sich somit feststellen, dass die Änderung kontinuierlich aber nicht proportional zum Druck verläuft. Das Verhältnis Tropfendurchmesser zu Intensitätswert ist über den betrachteten Druckbereich annähernd proportional. Die absolute Höhe der Staubreduzierung wird jedoch nicht durch die Tropfengröße, sondern durch den Volumenstrom, also die absolute Wassermenge bestimmt. Dies zeigt sich an einem Vergleich im Bereich 70 bis 75 μm (Abbildung 117); mit der größeren Düse werden trotz gleicher Tropfendurchmesser wesentlich geringere Intensitätswerte erreicht (Abbildung 117), denn der Volumenstrom und damit die Wassermenge ist in dem betrachteten Tropfengrößenbereich von 70 bis 75 μm bei der 0,7 mm Düse größer (Abbildung 118).

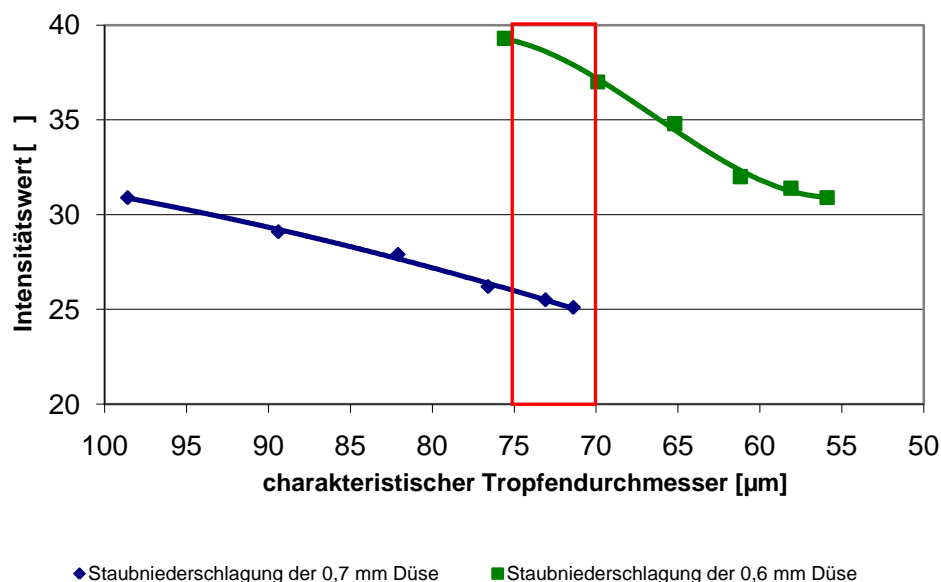


Abbildung 117: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und charakteristischem Tropfendurchmesser bei der 0,6 mm und 0,7 mm Düse

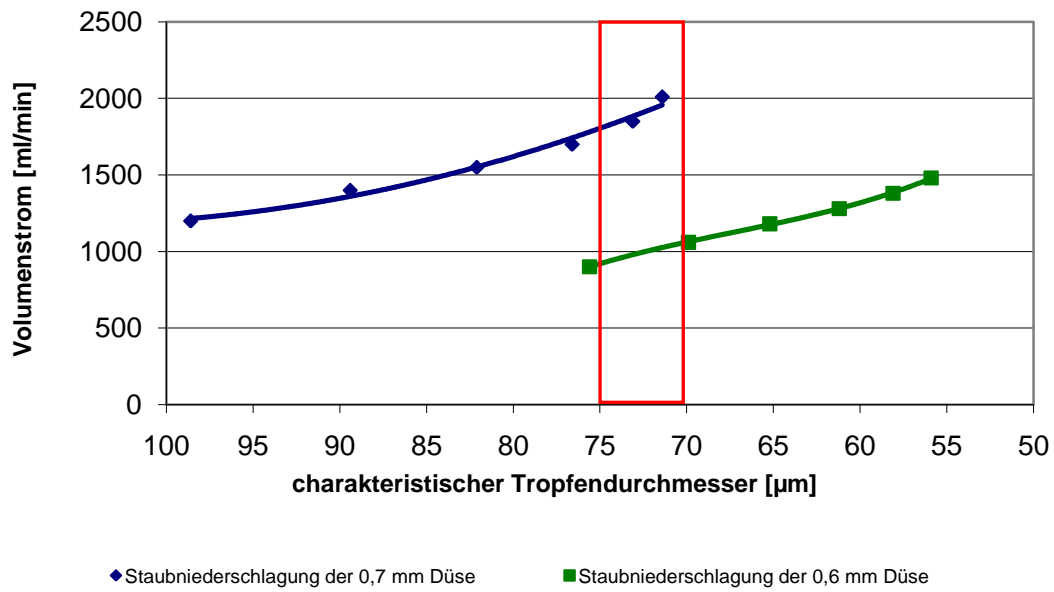


Abbildung 118: Zusammenhang zwischen Volumenstrom und charakteristischem Tropfendurchmesser bei der 0,6 mm und 0,7 mm Düse

10.1.3.2 Änderung des Düsendurchmessers

Betrachtet man die durch den Düsendurchmesser hervorgerufene Änderung der Tropfengröße, so lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse mit den theoretischen Annahmen übereinstimmen: Die Intensitätswerte reduzieren sich bei Verwendung der 0,7 mm Düse im Mittel um 20 % und die Werte des Sauterdurchmessers um 27 % (Tabelle 27 und Tabelle 28).

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Intensitätswert der 0,6 mm Düse []	39,3	37,0	34,8	32,0	31,4	30,9
Intensitätswert der 0,7 mm Düse []	30,9	29,4	27,9	26,2	25,5	25,1
Differenzbetrag Intensitätswert zwischen 0,6 mm und 0,7 mm Düse [ml/min]	- 8,4	- 7,6	- 7,0	- 5,8	- 5,8	- 5,7
Verhältnis des Intensitätswerts der 0,6 zu der 0,7 mm Düse []	- 0,21	- 0,21	- 0,20	- 0,18	- 0,19	- 0,19

Tabelle 27: Veränderung der Intensitätswerte bei unterschiedlichem Düsendurchmesser

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Sauterdurchmesser der 0,6 mm Düse [µm]	75,6	69,9	65,2	61,2	58,1	55,9
Sauterdurchmesser der 0,7 mm Düse [µm]	98,6	89,4	82,1	76,6	73,1	71,4
Verhältnis Sauterdurchmesser der 0,6 zu der 0,7 mm Düse []	- 0,30	- 0,28	- 0,26	- 0,25	- 0,26	- 0,28

Tabelle 28: Veränderung des Sauterdurchmessers bei unterschiedlichem Düsendurchmesser

Der Reduzierungsbetrag der Intensitätswerte und der des Sauterdurchmessers verändern sich zwischen der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse kontinuierlich mit dem Wasserdruck. Weiterhin zeigt sich, dass die Reduzierung der Sauterdurchmesser in den einzelnen Druckbereichen annähernd proportional zu der jeweiligen Reduzierung der Intensitätswerte ist. Der Differenzfaktor liegt im Mittel bei 0,38 bei einer Standardabweichung von 1,8 %.

	30 bar	40 bar	50 bar	60 bar	70 bar	80 bar
Reduzierung der Werte des Sauterdurchmessers bei Verwendung der 0,7 mm Düse	23,00	19,50	16,90	15,40	15,00	15,50
Reduzierung der Intensitätswerte bei Verwendung der 0,7 mm Düse	8,40	7,90	6,90	5,80	5,90	5,80
Differenzfaktor	0,37	0,41	0,41	0,38	0,39	0,37

Tabelle 29: Zusammenhang zwischen Reduzierung der Werte des Sauterdurchmessers im Vergleich zu den Intensitätswerten

Dieser Zusammenhang lässt annehmen, dass bei Veränderung des Düsendurchmessers die Höhe der Staubreduzierung von der Änderung des Sauterdurchmessers bestimmt wird.

10.1.4 Optimierung der Staubbindung durch die Betriebsparameter

Wie bereits angesprochen gibt es praktische Erfahrungen im Gewinnungsbereich, dass der Einsatz einer 0,7 mm Düse effektiver ist. Dieses wird durch die Ergebnisse aus Kapitel 10.1.1 bis 10.1.3 bestätigt. Es zeigt sich, dass der Volumenstrom den ausschlaggebenden Faktor darstellt und die Tropfengröße eher mit dem Betrag der Veränderung korreliert. Dabei bestimmt nicht die Änderung des Volumenstroms – unabhängig, ob durch den Druck oder den Düsendurchmesser hervorgerufen – sondern die absolute Menge an Wasser das Ergebnis der Staubreduzierung.

Diese Ergebnisse bestätigen die praktischen Erfahrungen mit dem größeren Düsendurchmesser und dem damit verbundenen höheren Volumenstrom. So ist es möglich, dass man beispielsweise den Wasserdruck der 0,7 mm Düse bis auf 55 bar herabsetzen kann, ohne eine wesentliche Erhöhung der Intensitätswerte hervorzurufen. Der Wert liegt noch deutlich unter dem Intensitätswert der mit der 0,6 mm Düse bei 80 bar erreicht wird. Erst bei einer Reduktion des Drucks auf 30 bar bei der 0,7 mm Düse, ergibt sich eine Staubintensität wie bei der 0,6 mm Düse bei 80 bar (vgl. Abbildung 121). Allerdings würde das Wasser durch den niedrigen Druck nicht mehr entlang der Schneidspuren in die Klüfte und Risse des Gebirges eindringen und somit auch nicht die Bindung von originärem Staub realisieren (vgl. Kapitel 7.1).

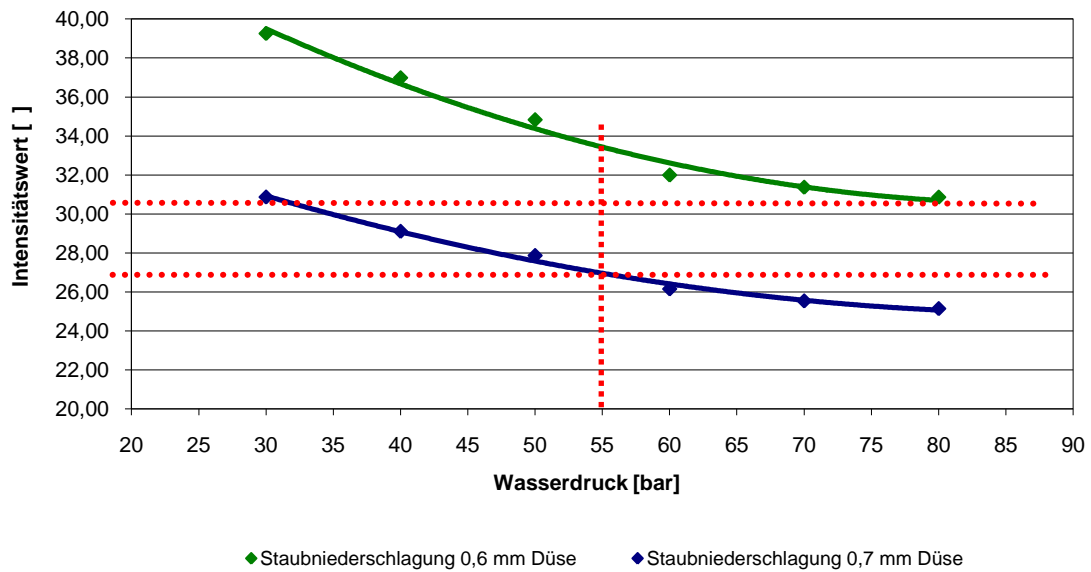


Abbildung 119: Veränderung der Intensitätswerte bei Änderung des Wasserdrucks bei der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse

Neben der Reduzierung der Staubmenge hat die 0,7 mm Düse weiterhin den Vorteil, dass durch den geringeren Druck weniger Energie benötigt wird. Auf der anderen Seite kommt es zu einer Erhöhung des Volumenstroms um rund 225 ml/min und somit auch zu einer Erhöhung des Wasseranteils in der Förderung.

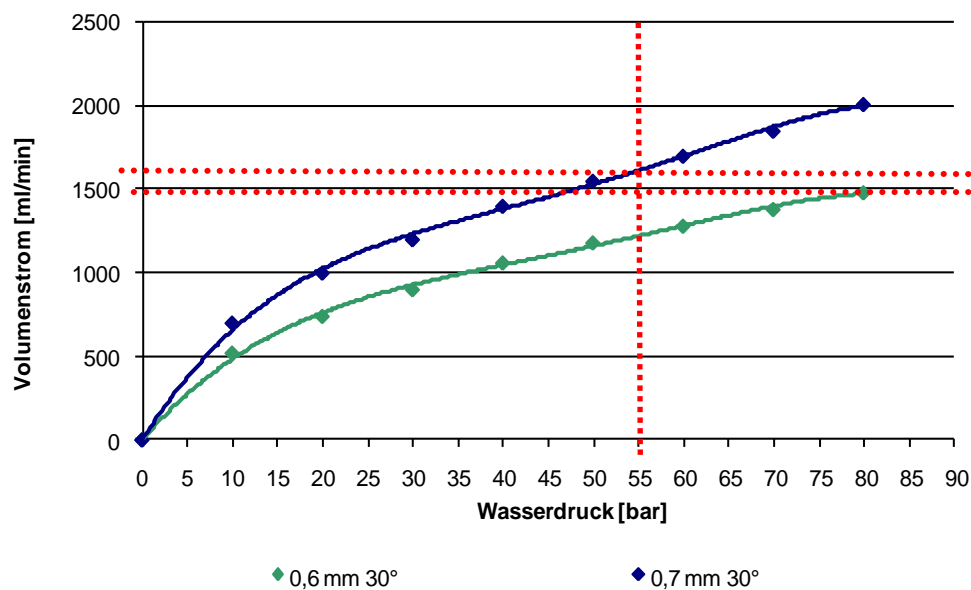


Abbildung 120: Veränderung des Volumenstroms bei Änderung des Wasserdrucks bei der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse

Neben dem Volumenstrom vergrößert sich der Tropfendurchmesser der 0,7 mm Düse bei 55 bar im Vergleich zu der 0,6 mm Düse bei 80 bar um rund 23 μm . Das bedeutet, dass die Tropfen schneller absinken.

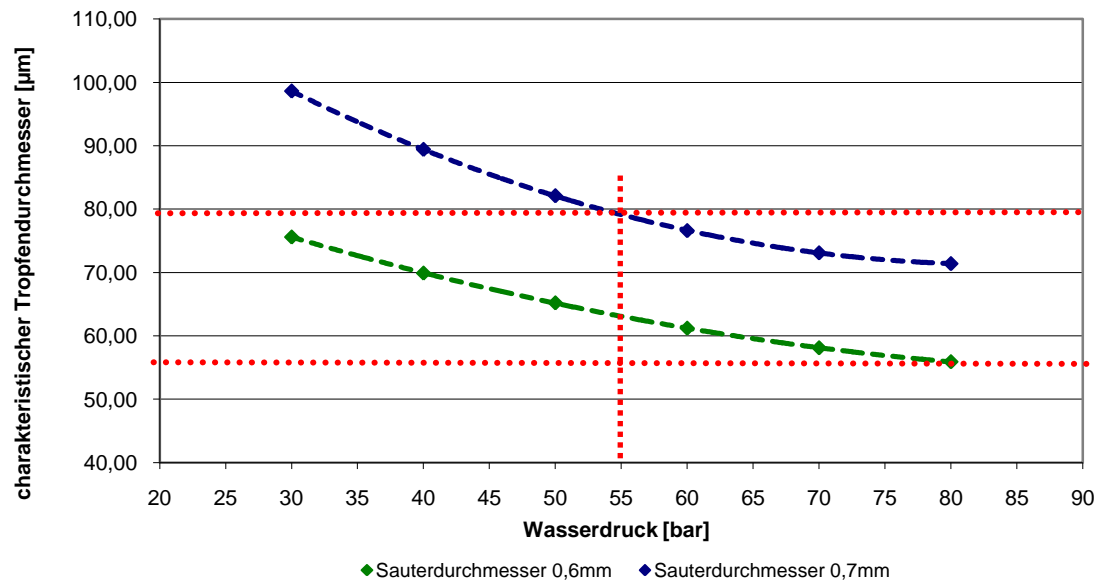


Abbildung 121: Veränderung der charakteristischen Tropfendurchmesser bei Änderung des Wasserdrucks der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse

10.2 Untersuchung der äußeren Einflussfaktoren anhand der 0,7 mm Düse

Im Rahmen der Untersuchung der äußeren Einflussfaktoren wird unter Zugrundelegung der im Kapitel 9.2 dargestellten Verbesserungen mit der 0,7 mm Düse im Folgenden nur diese Düse betrachtet.

Zu den äußeren Einflussfaktoren zählen

- Geschwindigkeit der Luft
- Temperatur der Luft

Zunächst soll die Geschwindigkeit konstant gehalten und die Wärme variiert werden. Das gilt gleichermaßen für die Umgebungstemperatur wie auch für die Temperatur der Sprühflüssigkeit. Da die Wassertemperatur unter Tage bisher nicht gezielt gesteuert wird und eigentlich von außen - von der Umgebung - bestimmt wird, wird die Temperatur der Flüssigkeit im Rahmen der äußeren Einflussparameter behandelt.

10.2.1 Äußere Einflussfaktoren bei konstanter Luftgeschwindigkeit

Der Versuchskanal ermöglicht die Untersuchung der Staubreduzierung bei unterschiedlichen Wetter- und Wassertemperaturen. Konstant bleibt dabei zunächst die Strömungsgeschwindigkeit der Luft mit rund 1 m/s.

Die Auswirkungen einer Erhöhung der Wassertemperatur von 15°C auf 40°C zeigen die in Abbildung 122 dargestellten Kurvenverläufe der Sauterdurchmesser.

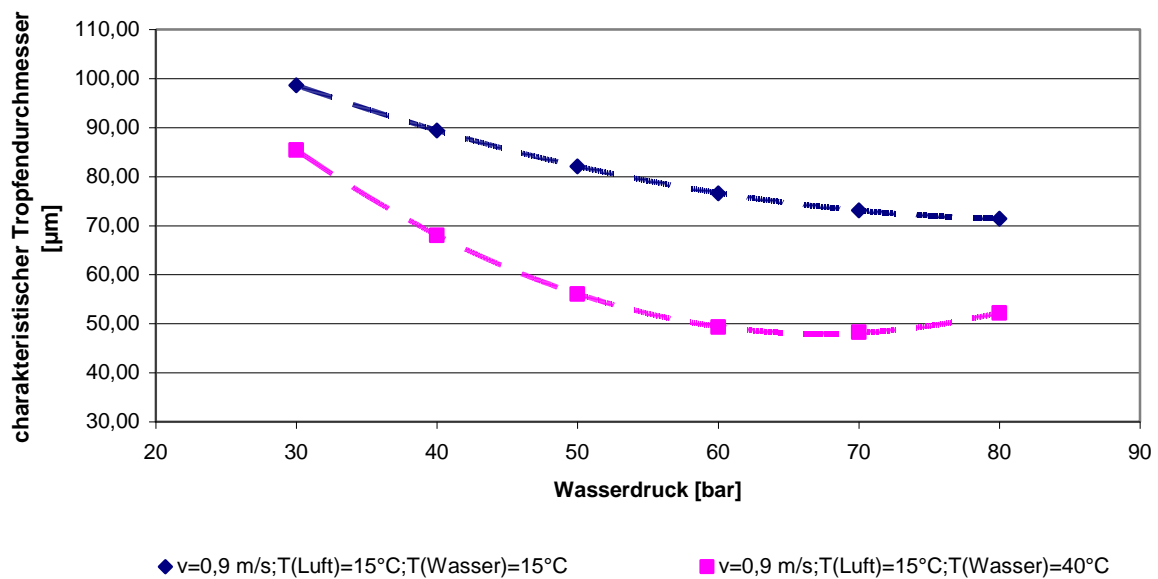


Abbildung 122: Zusammenhang zwischen charakteristischem Tropfendurchmesser und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 15°C Lufttemperatur

Scheinbar bewirkt die Temperaturerhöhung des Wassers eine Verringerung des Tropfendurchmessers. Aus physikalischer Sicht kann keine Verringerung durch Verdunstung stattfinden, da die Umgebungstemperatur zu niedrig ist. Die Verringerung der Tropfengröße muss daher durch die sinkende Oberflächenspannung (vgl. Tabelle 7) hervorgerufen werden. Wie dargestellt wird der Zerstäubungsprozess unter anderem von dieser physikalischen Eigenschaft beeinflusst. In dem vorliegenden Fall wird die Oberflächenspannung um den Wert $4 \times 10^{-5} \text{ N/cm}$ verringert, was gemäß Kapitel 5 eine Verringerung der Tropfengröße bedeutet.

Betrachtet man dazu die Staubreduzierung bei 15°C Lufttemperatur, so zeigt sich, dass der Intensitätswert bei 15°C Wassertemperatur geringer als bei 40°C ist (Abbildung 123).

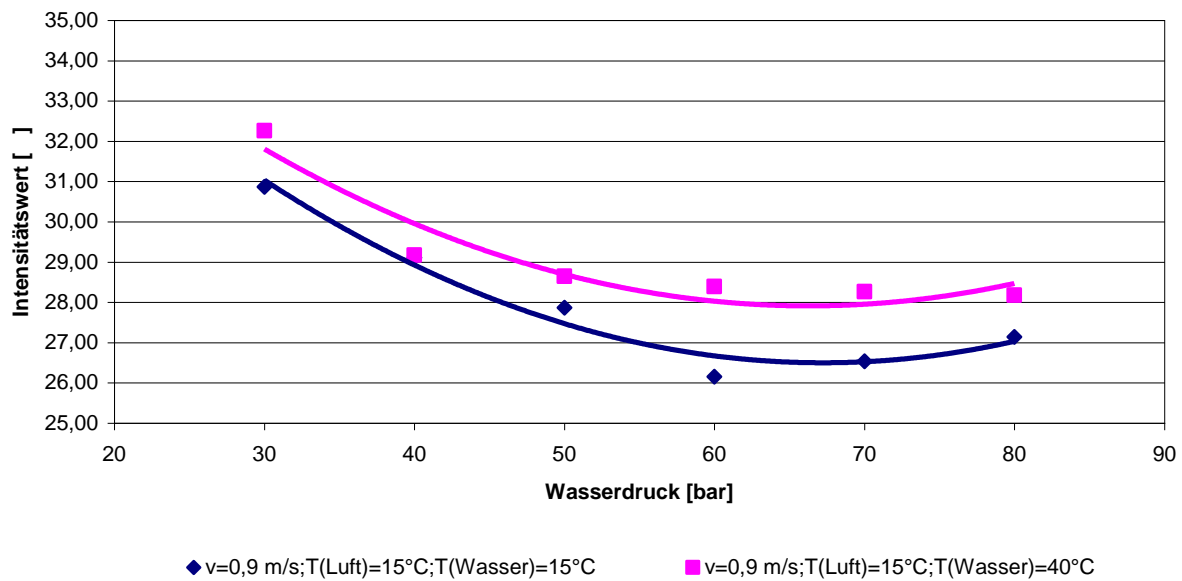


Abbildung 123: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 15°C Lufttemperatur

Vergleicht man das Ergebnis der Staubuntersuchung mit der der Tropfenanalyse, so widerspricht es der theoretischen Annahme, dass kleine Tropfen eine bessere Staubbinde-eigenschaft besitzen. Die verbleibende Staubmenge in der Luft ist bei kälterem Wasser stets geringer, obwohl die Tropfen größer als bei wärmeren Wasser sind. Da es sich um gleiche Düsendurchmesser handelt und somit die Volumenströme gleich sind, lässt sich die verbesserte Staubbindung bei kälterem Wasser auch nicht auf die Wassermenge zurückführen. Somit lässt sich die Veränderung der Staubreduzierung bei unterschiedlichen Wassertemperaturen nicht durch Änderungen der Betriebsparameter Tropfengröße oder Volumenstrom erklären.

Es kommt vermutlich zu einer Wärmeströmung von der warmen Flüssigkeit zur der kühleren Luft. Es entstehen thermische Bewegungen, die die Staubbindung beeinträchtigen. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit den von Armbruster /18/ beschriebenen Diffusionskräften.

Erhöht man die Lufttemperatur auf 40°C, so zeigt sich, dass der charakteristische Tropfendurchmesser bei einer höheren Wassertemperatur (40°C im Vergleich zu

15°C) kleiner ist (Abbildung 124).

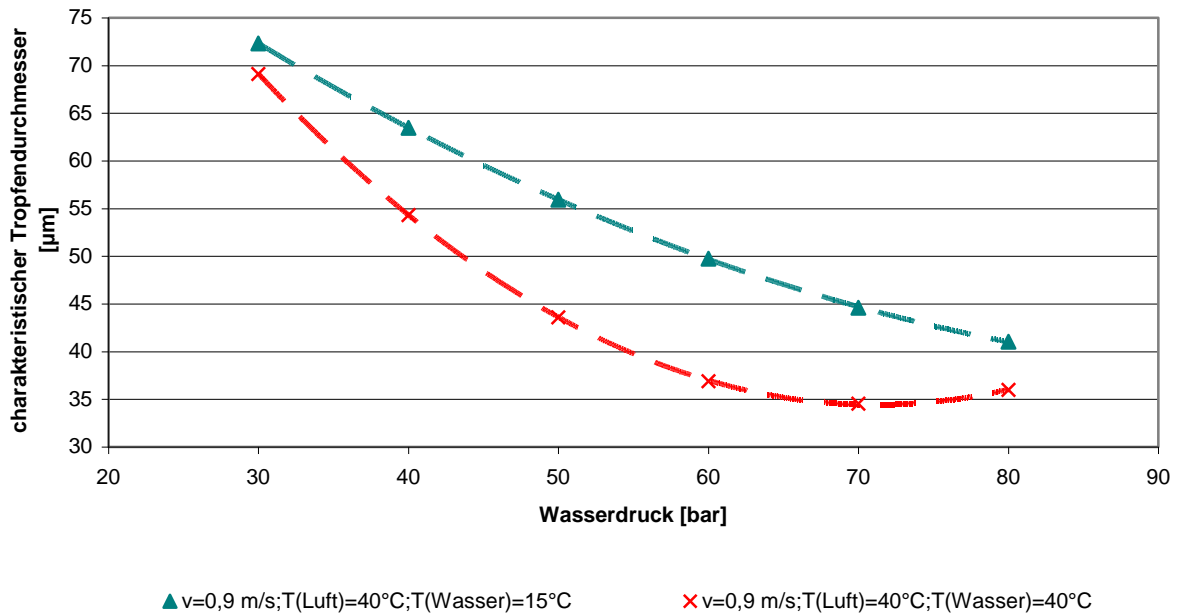


Abbildung 124: Zusammenhang zwischen charakteristischem Tropfendurchmesser und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 40°C Lufttemperatur

Es ist anzunehmen, dass beim Versprühen des 15°C kalten Bedüsungswassers in die 40°C warme Luft die Umgebungseinflüsse das Tropfenspektrum verändern. Die Flüssigkeit kühlt die umgebende Luft ab, dabei wird der Luft durch Kondensation Wasser entzogen. Die Kondensationstropfen werden bei der Messung erfasst und durch die höhere Tropfenanzahl wird der Sauterdurchmesser als Durchschnittswert verändert.

Der Flüssigkeitsentzug aus der Luft zeigt sich an einem Vergleich der relativen Feuchtigkeit an der Messstelle 2 (= Feuchtigkeit hinter der Bedüsung), bezogen auf den Wert der Messstelle 1 (= Feuchtigkeit vor der Bedüsung). Bei 15°C kaltem Wasser und 40°C Lufttemperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit um über 40 % geringer als die Feuchtigkeit an der Messstelle 1. Die relative Feuchtigkeit bei 40°C warmen Wasser und 40°C Lufttemperatur liegt dagegen um 40 bis 60 % über dem Ausgangswert (Abbildung 125).

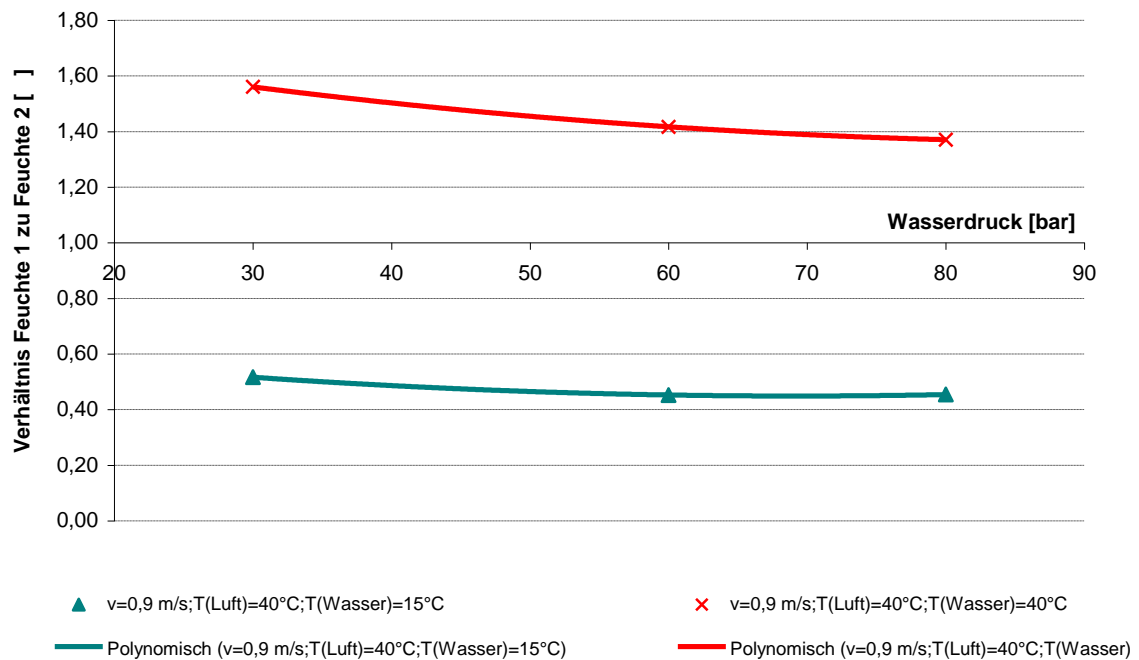


Abbildung 125: Vergleich der relativen Feuchtigkeit an den Messstellen 1 und 2 bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 40°C Lufttemperatur

Durch die Kondensation des Wassers aus der Luft wird die absolute Wassermenge erhöht. Aus diesem Grund ist bei 40° C Lufttemperatur die Staubbinding bei Verwendung von kälterem Wasser trotz größerer Tropfen besser (Abbildung 126).

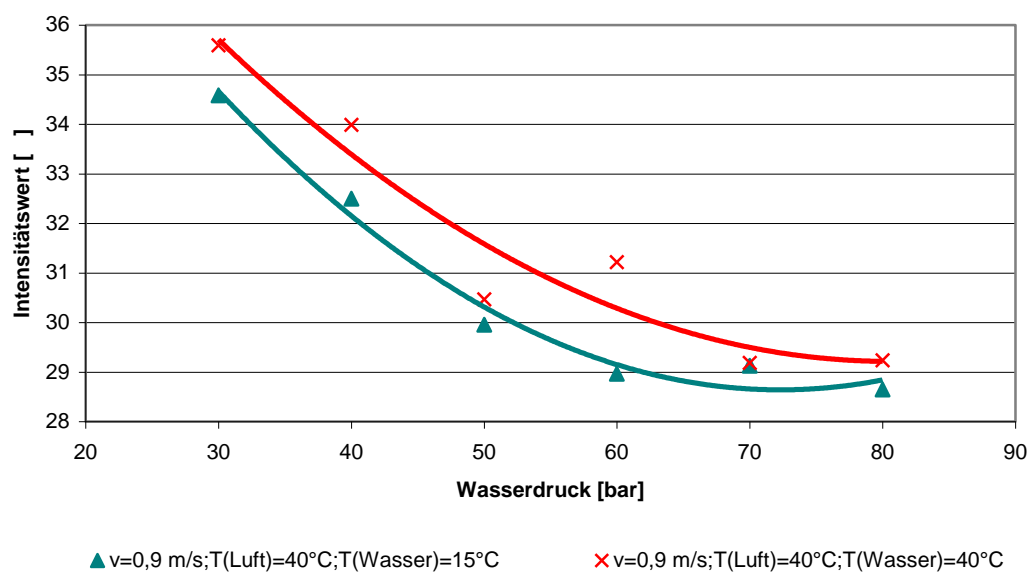


Abbildung 126: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 40°C Lufttemperatur

Hier kommt es vermutlich zu einer Strömung von der wärmeren Luft zu dem kühleren Fluid, wodurch die Staubbindung gefördert wird. In diesem Versuch werden die Staubpartikel durch die thermische Strömung zu dem Wasser geführt und dort gebunden.

10.2.2 Äußere Einflussfaktoren bei unterschiedlicher Luftgeschwindigkeit

Die in Kapitel 9.3.1 dargestellten Versuchsergebnisse erfolgten bei einer Luftgeschwindigkeit von rund 1 m/s. Im Folgenden soll die Auswirkung einer Änderung der Geschwindigkeit auf die Staubbindung untersucht werden.

Am prinzipiellen Verlauf der Staubreduzierung ändert sich kaum etwas. Die unter Kapitel 9.3.1 dargestellten Zusammenhänge hinsichtlich des warmen und kalten Wassers bei einer Lufttemperatur von 15 °C bzw. 40°C lassen sich unmittelbar übertragen. Durch Diffusionskräfte wird die Staubbindung verbessert; allerdings ist im Vergleich zu den Versuchen mit 1 m/s Luftgeschwindigkeit der Abstand zwischen den Staubreduzierungskurven unterschiedlich. Dies ist auf die höhere Luftgeschwindigkeit zurückzuführen (Abbildung 127).

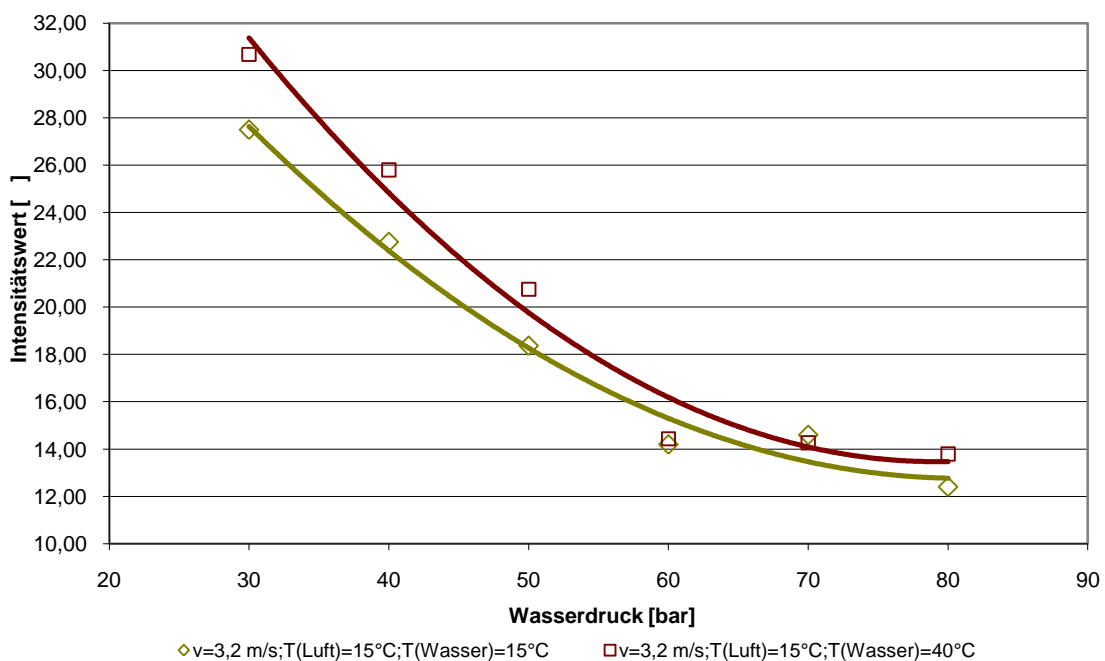


Abbildung 127: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 15°C Lufttemperatur

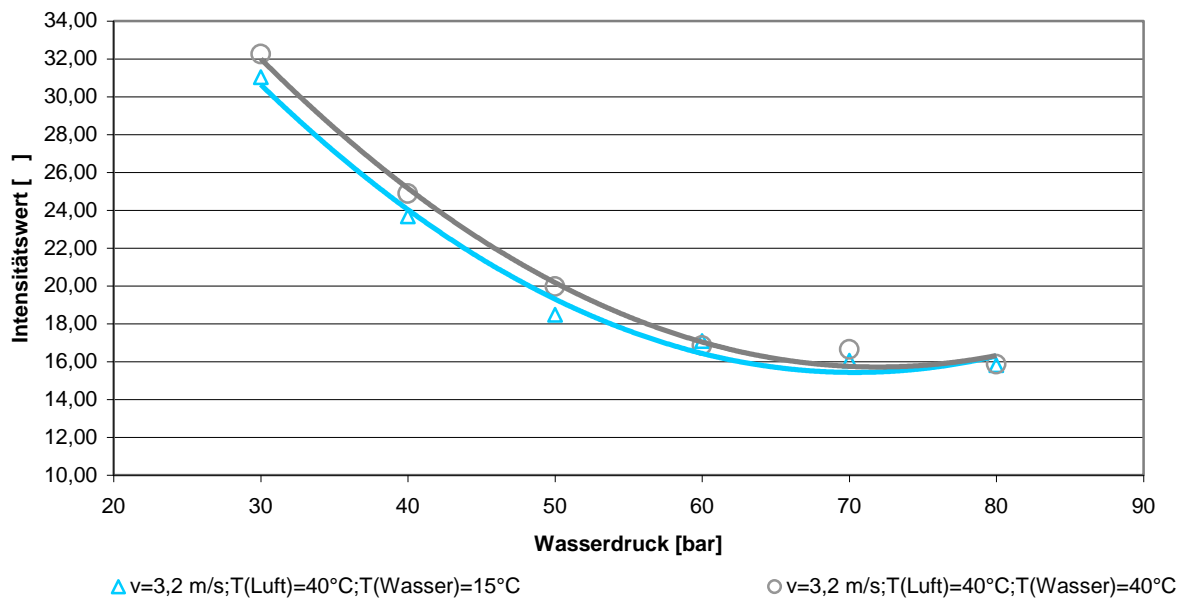


Abbildung 128: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck bei unterschiedlichen Wassertemperaturen und 40°C Lufttemperatur

Vergleicht man die Ergebnisse der Staubreduzierung bei 1 und 3 m/s Luftgeschwindigkeit, so zeigt sich, dass die ermittelte Staubmenge bei höherer Geschwindigkeit grundsätzlich – unabhängig von den Einflussfaktoren - geringer ist (Abbildung 129).

Dies widerspricht jedoch den theoretischen Erkenntnissen: Durch die hohe Geschwindigkeit müsste der Staub – sowohl der benetzte als auch der nicht benetzte – weiter als bei geringerer Geschwindigkeit transportiert werden. Dementsprechend müssten die Intensitätswerte des Tyndallometers höher sein.

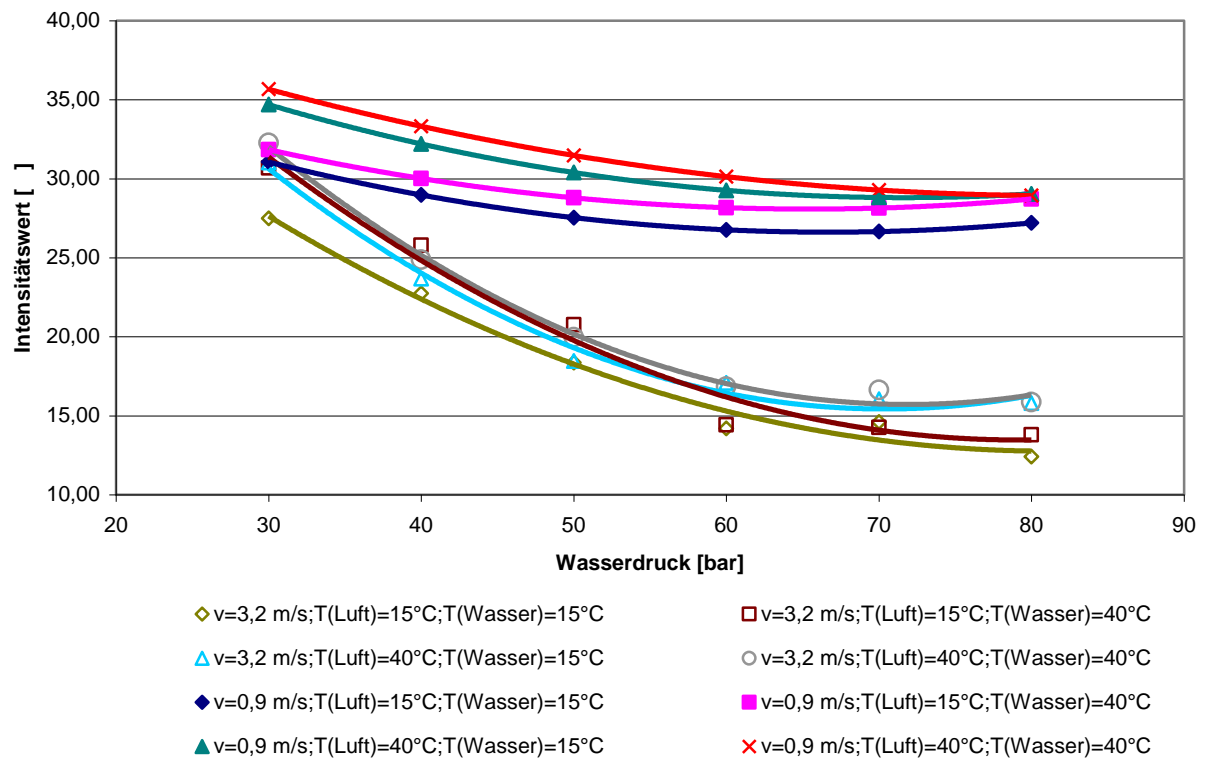


Abbildung 129: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck bei unterschiedlicher Wasser- und Lufttemperatur

Um diese Theorie nachzuweisen, wurde eine gravimetrische Gesamtstaubmessung ohne Bedüsung durchgeführt die zeigt, dass bei höherer Geschwindigkeit mehr Staub den Messort erreicht (Abbildung 130).

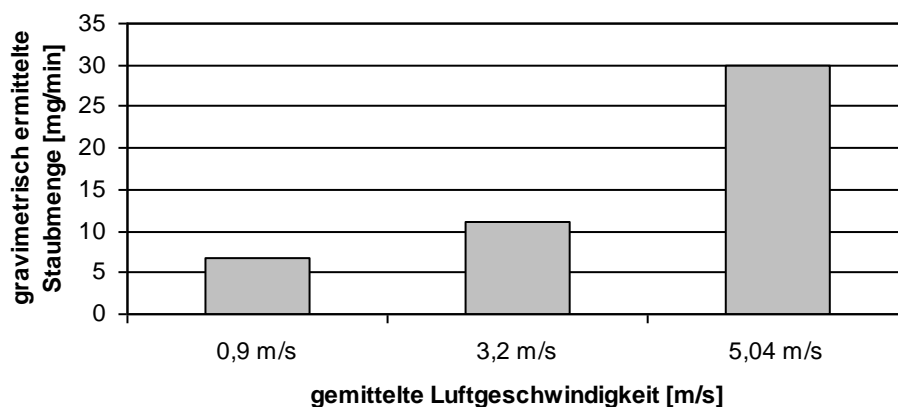


Abbildung 130: Zunehmende Staubmenge in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

Die höhere Feinstaubreduzierung bei größerer Luftgeschwindigkeit hat also andere Ursachen: Durch die hohe Geschwindigkeit werden offensichtlich die feinen Tropfen im Kanal stärker verteilt. Es entsteht eine Art Wasserfront. Die absolute Wassermenge bzw. die Wassertropfen haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Staubreduzierung. Durch die Wasserfront bilden sich sekundäre Staubbindingen und dadurch kommt es zu einer verbesserten Staubbinding.

10.3 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe, wie Tenside, nicht bei jedem Staub gleich. Das im Steinkohlenbergbau eingesetzte ContraDust, der Firma CST, Gladbeck, ist auf Kohlenstaub abgestimmt. Die folgenden Versuche werden mit Kohlenstaub aus dem Bergwerk Ibbenbüren durchgeführt. Die Kornfraktion ist vergleichbar mit dem DIN-Schiefermehlstaub.

Durch den Einsatz von Tensiden wird die Oberflächenspannung herabgesetzt. Dies wirkt sich auf den Tropfenbildungsmechanismus in der Form aus, dass die Tropfen kleiner werden (Abbildung 131).

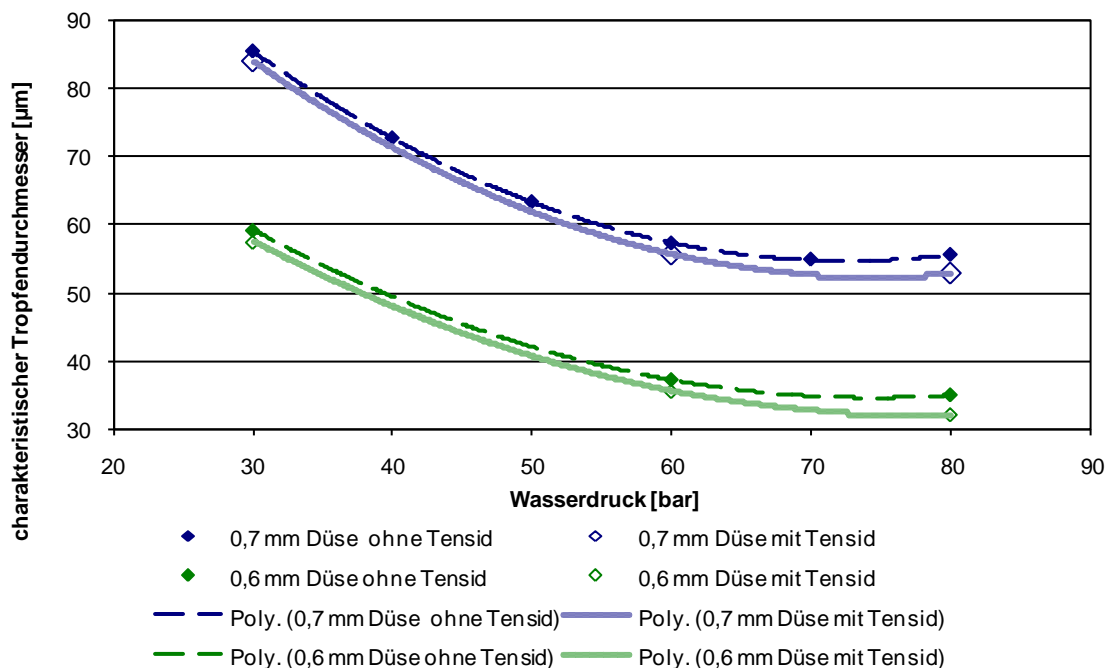


Abbildung 131: Zusammenhang zwischen charakteristischem Tropfendurchmesser und Wasserdruck bei der 0,6 und 0,7 mm Düse

Entsprechend muss sich die ermittelte Staubmenge beim Einsatz von Tensiden redu-

zieren. Bei der 0,6 mm Düse ist die Reduzierung der Tropfengröße effektiver hinsichtlich der Staubbindung als bei der 0,7 mm Düse. Bei der 0,7 mm Düse ist die Effektivität, insbesondere im höheren Druckbereich, geringer. (Abbildung 132).

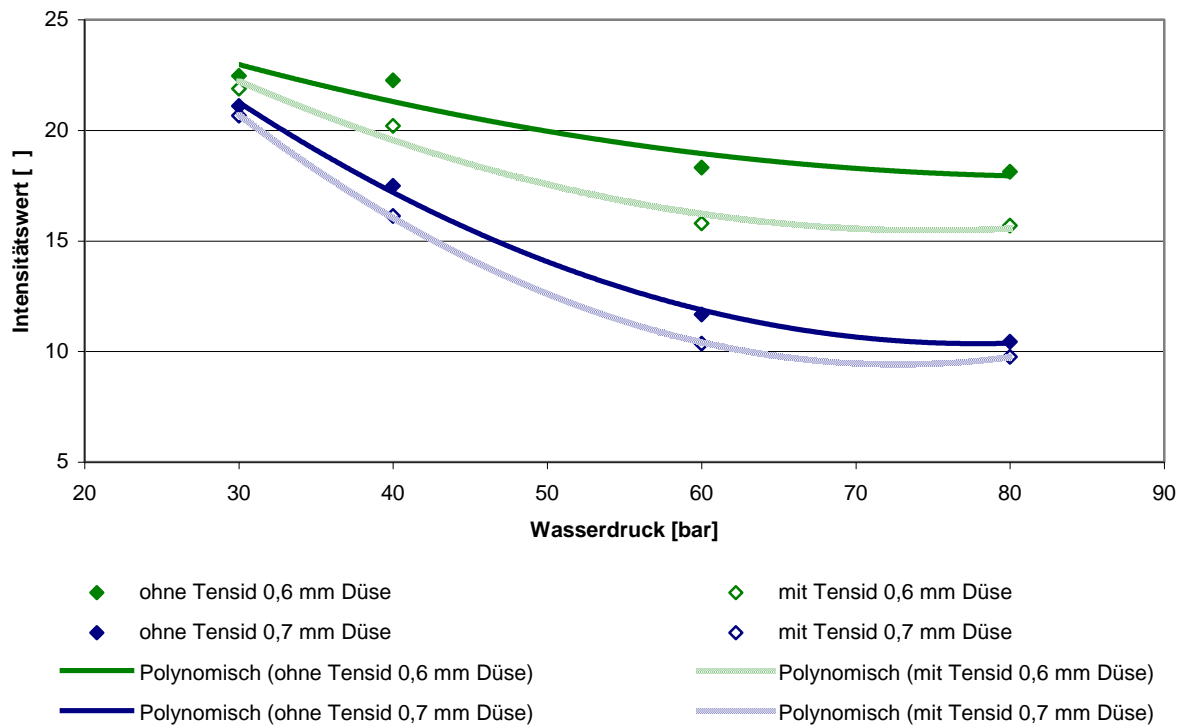


Abbildung 132: Vergleich der Reduzierung der Intensitätswerte (in Bezug auf den Wasserdruck) bei einer Lüfterdrehzahl von 200 U/min

Die prozentuale Differenz zwischen den Intensitätswerten mit und ohne Tensid der jeweiligen Düse ist in Abbildung 133 dargestellt. Die Staubintensität ist bei der 0,7 mm Düse im Mittel um 7 %, bei der 0,6 mm Düse um 10% geringer.

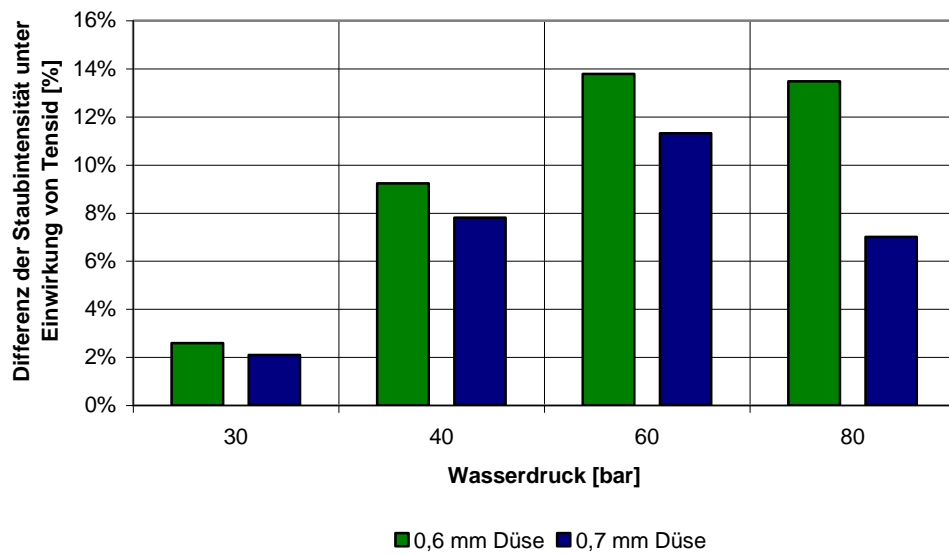


Abbildung 133: Differenz der Staubintensität unter Einwirkung von Tensid mit der 0,6 mm Düse im Vergleich zur 0,7 mm Düse in Bezug auf den Wasserdruck

Weiterhin zeigt sich, dass sich die Verbesserungsrate mit zunehmendem Druck ändert. Je höher der Druck, desto größer ist die Differenz der Intensitätswerte mit und ohne Tensid. Dies unterstützt die These, dass bei gleichbleibendem Druck nicht nur die Tropfengröße ausschlaggebend für die Höhe der Reduzierung ist, sondern vor allem die absolute Wassermenge.

11 Bewertung der wesentlichen Einflussfaktoren und deren Abbildung im Versuchsstand

Mit dem neuen Versuchsstand am Institut für Bergbau ist es möglich, verschiedene Einflussfaktoren unter gleichbleibenden Bedingungen zu untersuchen. Es ist allerdings nicht möglich alle Arten von Einflussfaktoren mit diesem Versuchstand abzubilden. Zu letzteren gehören Veränderungen des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit. Das bedeutet, dass die Übertragbarkeit auf die Verhältnisse unter Tage nur bedingt möglich ist. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, dass Beeinflussungen auftreten, und dass diese mit den Ergebnissen aus Referenzversuchen deckungsgleich sind bzw. sich aus der Theorie eindeutig erklären lassen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man bei den **Betriebsparametern** zwischen indirekten und direkten Auswirkungen unterscheiden muss.

Der Wasserdruck wirkt sich nur indirekt über die Tropfengröße bzw. den Volumenstrom auf die Staubreduzierung aus. Direkt beeinflussen nur Tropfengröße und Wassermenge die Staubreduzierung. Die direkten Auswirkungen lassen sich noch dahingehend unterscheiden, ob sie die Höhe der Staubreduzierung insgesamt oder den Betrag der Staubreduzierung zwischen zwei Druckstufen bzw. Düsen betreffen.

Es konnte nachgewiesen werden, dass bei gleichen Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Wassertemperatur etc.) der Volumenstrom bzw. die absolute Wassermenge das ausschlaggebende Kriterium für die Staubbindung ist. Dabei ist es unerheblich, ob die Veränderung durch den Düsendurchmesser oder den Druck bedingt wird.

Anders verhält sich der Betriebsparameter Tropfengröße. Ändert sich der Sauterdurchmesser mit dem Druck, so kommt es zu einer proportionalen Änderung des Intensitätswerts. Diese Proportionalität ist je nach Düsendurchmesser unter-

schiedlich, so dass bei unterschiedlichen Düsengrößen aber gleichem Tropfendurchmesser die Staubreduzierung nicht identisch ist. Das bedeutet, dass die Tropfengröße nur für den Betrag der Änderung der Staubreduzierung verantwortlich ist.

Die Auswirkungen der physikalischen Stoffeigenschaften zeigen sich indirekt im Zusammenspiel mit den **äußeren Einflussfaktoren**. Bei Verwendung von warmem Wasser verändert sich die Oberflächenspannung und bei der Zerstäubung entstehen dadurch kleinere Tropfen. Theoretisch führt dies zu einer besseren Staubbindeeigenschaft, denn nach Worpus /56/ kommt es zu einer besseren Staubbindung, wenn Tropfen und Partikel ähnlich groß sind (vgl. Kapitel 4.2). Wird dieses warme Wasser jedoch in kältere Luft versprüht, so entstehen thermischen Strömungen, die den erforderlichen Kollisionskurs zwischen Tropfen und Staub behindern. Die Staubintensität ist hierbei höher als die bei Wasser mit Umgebungstemperatur.

Wenn kühleres Wasser in eine wärmere Umgebung gesprüht wird, kommt es zur Kondensation und die entstehenden Wassertropfen unterstützen die Staubbindung. Das bedeutet, dass die äußeren Einflussfaktoren im Fall eines Temperaturgefälles zwischen Luft und Sprühmedium stärkere Auswirkung auf die Staubbindung haben als indirekt – über die Tropfengröße – wirkende Oberflächeneigenschaften.

Wenn kein Temperaturgefälle zwischen Wasser und Luft vorhanden ist, so lässt sich mit kühlerem Wasser und entsprechend temperierter Luft eine bessere Staubreduzierung erreichen. Betrachtet man die Tropfengrößenverteilung bei einer Wasser- und Lufttemperatur von 15 bzw. 40°C (isotherme Bedingungen), so sind die Tropfen bei warmem Wasser in warmer Umgebung wegen der geringeren Oberflächenspannung kleiner (Abbildung 134).

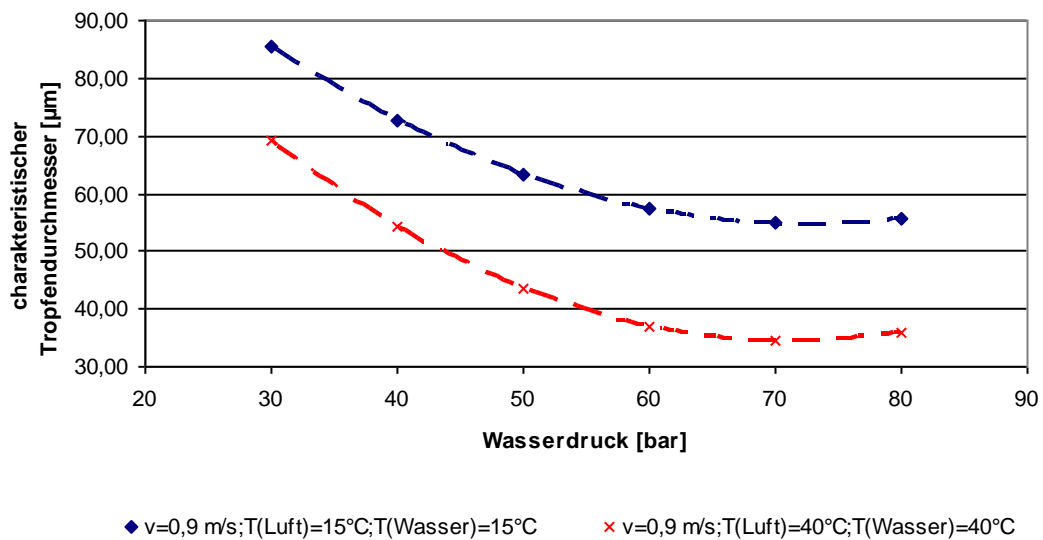


Abbildung 134: Zusammenhang zwischen charakteristischem Tropfendurchmesser und Wasserdruck unter isothermen Bedingungen

Trotz der kleineren Tropfen ist die Staubreduzierung dennoch nicht effektiver, denn nicht nur das Wasser verändert seine physikalischen Eigenschaften, sondern auch die Luft. Ein unterschiedliches Strömungsverhalten bei warmer bzw. kalter Luft ist die Folge. Dies muss ursächlich für die schlechtere Staubbindung in warmer Umgebung sein (Abbildung 135).

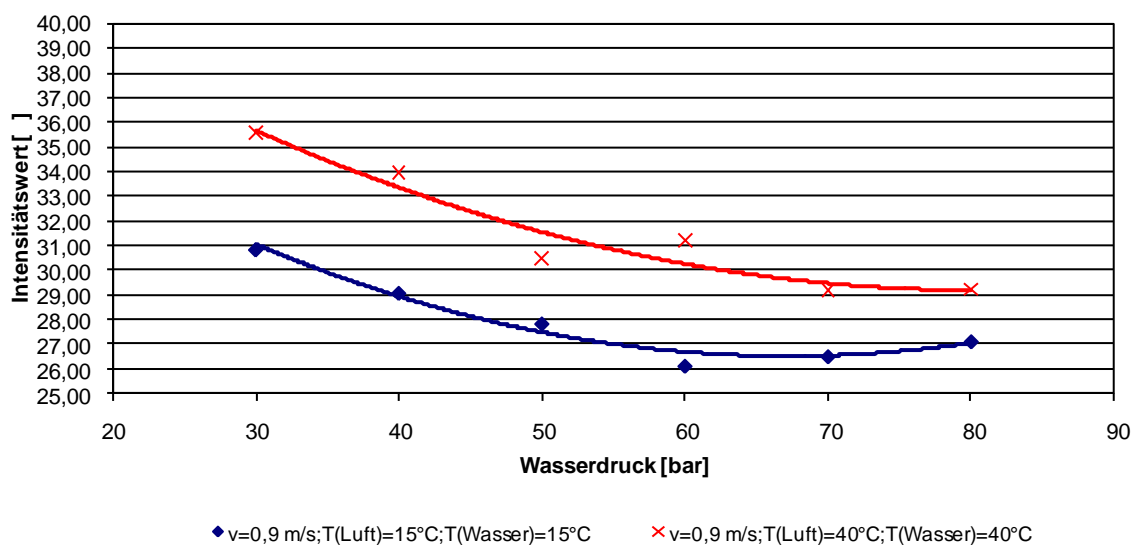


Abbildung 135: Zusammenhang zwischen Intensitätswert und Wasserdruck unter isothermen Bedingungen

Im Gegensatz zu thermischen Einflussfaktoren bewirkt die durch **Tenside** hervorgerufene Änderung der Oberflächenspannung nicht nur eine Verkleinerung der Tropfengröße, sondern auch eine verbesserte Staubbinding. Vergleicht man die Ergebnisse der 0,6 mm und der 0,7 mm Düse mit und ohne Tensid, stellt sich allerdings die Frage, ob es nicht sinnvoller ist, anstelle des Tensids von vornherein eine größere Düse mit einem geringeren Betriebsdruck einzusetzen. Als Nachteil steht dieser Variante allerdings ein höherer Wasserverbrauch gegenüber.

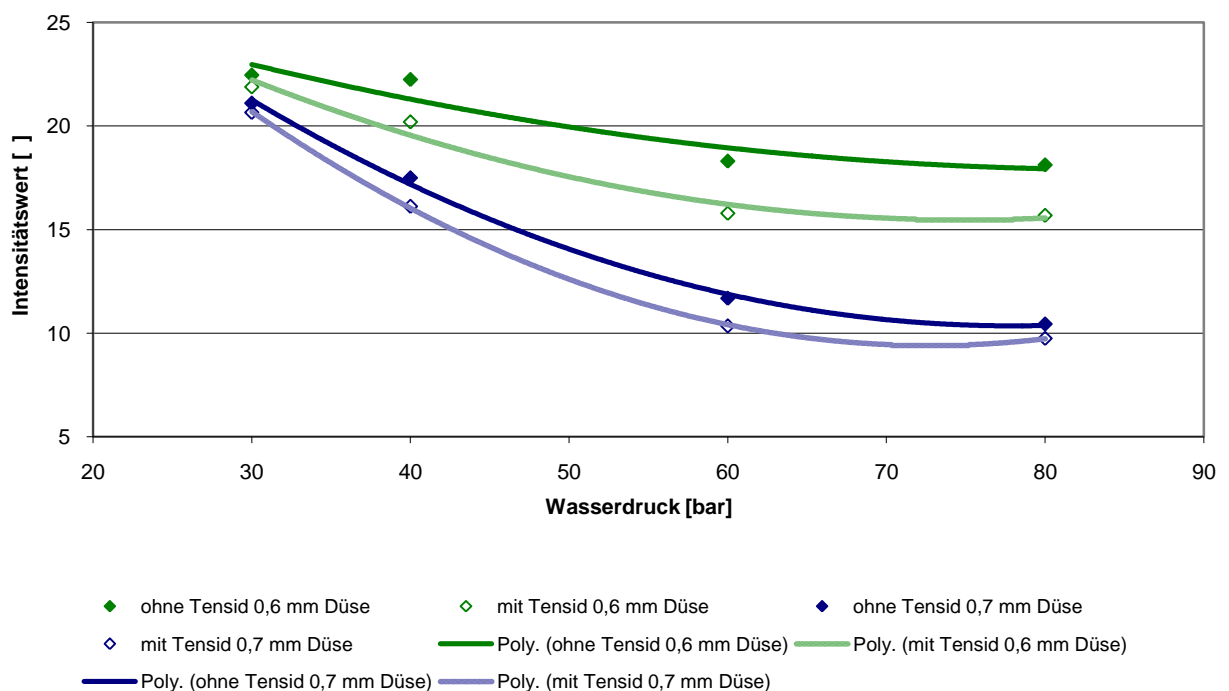


Abbildung 136: Zusammenhang zwischen Intensitätswerten und Wasserdruck unter isothermen Bedingungen

In einem ersten Bewertungsschritt lassen sich folgende positive und negative Argumente zum Tensid-Einsatz herleiten:

- Vorteile für den Einsatz von Tensiden
 - bessere Staubbinding
 - weniger Verkrustungen
 - höhere Drücke lassen u. U. das Wasser stärker in die Klüfte eindringen und binden dort originären Staub besser

- Nachteile für den Einsatz von Tensiden
 - zusätzliche technische Ausrüstung für das Eingeben des Tensids

Die Entscheidung zur Verwendung von Tensiden ist also spezifisch für den Einzelfall zu bestimmen.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchsstand ermöglicht es, die verschiedenen Einsatzfälle einander gegenüberzustellen. Die durchgeführten Versuche hinsichtlich der Auswirkungen der Einflussparameter haben gezeigt, dass bei einer Untersuchung der Staubreduzierung möglichst viele Einflussparameter betrachtet werden müssen, um eine realistische Aussage für den jeweiligen Einsatzfall zu treffen.

Im Vergleich zu den Referenzversuchen (vgl. Kapitel 7) zeigen die Ergebnisse vergleichbare Ergebnisse. Die Unterschiede lassen sich auf die unterschiedliche Messtechnik, die zugrunde gelegten Randbedingungen und den Aufbau zurückführen. Dies hat aber keine Auswirkung auf die Aussagekraft der Ergebnisse. Denn alle Untersuchungen in einem Versuchsstand, also in mehr oder weniger verkleinertem Maßstab, haben Differenzen zu In-Situ-Messungen.

Der aktuelle Versuchsstand ist daher in vielerlei Hinsicht gegenüber den bisherigen Aufbauten von Vorteil:

- Es lassen sich für den Steinkohlenbergbau alle Bedüsungsarten im Gewinnungsbereich und Streb-Strecken-Übergang unter vergleichbaren Bedingungen abbilden.
- Die wesentlichen Einflussfaktoren, die sich deutlich und nicht prognostizierbar auf die Staubreduzierung auswirken, können realitätsnah und ebenfalls unter vergleichbaren Bedingungen abgebildet werden.

In den bisherigen Versuchen war eine derartige Betrachtung nur im Hinblick auf bestimmte Einflussfaktoren oder eine Gewinnungsmethode etc. möglich.

- Die eingesetzte Messtechnik entspricht dem neuesten Stand der Technik (Laserbeugungsmessgerät, digitalisierte Aufnahme der Betriebsparameter mit vollautomatischem EDV-Abgleich etc.) und es lassen sich auch die in der Praxis verwendeten Messtechniken (z. B. Tyndallometer) einsetzen.

Darüber hinaus lassen sich im gewissen Rahmen auch sonstige Einflussfaktoren wie beispielsweise die Auswirkungen der Meißeltemperatur durch die Möglichkeit des Einbaus entsprechender Meißelhalter im Maßstab 1:1 abbilden.

12 Ausblick

12.1 Untersuchungen im Bereich der Steinkohलगewinnung

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, setzt der so aufgebaute Versuchsstand neue Maßstäbe im Bereich der Untersuchung von Bedüsungseinrichtungen nicht nur im Steinkohlenbergbau. Er ist auf Grundlage verschiedener Versuchsstände entstanden, die in vergangenen Jahren wesentliche Aussagen zur Reduzierung der Staubmengen im Steinkohlenbergbau getroffen haben. Deren Ergebnisse spiegeln sich in Rechtsnormen und betrieblichen Anweisung wieder und machten Vorgaben, wie eine Bedüsung auszuführen ist. Anhand des hier geführten Probeinsatzes und der vergleichbaren Ergebnisse zu den bisher stattgefundenen Untersuchungen, ist der neue Versuchsstand in der Lage, gleichwertige Aussagen zu treffen und darüber hinaus auch die bisher nicht vordringlich betrachteten Wechselwirkungen zu untersuchen. In der allgemeinen Technik spricht man in solch einem Fall von Best Available Technology.

In weiteren Versuchsreihen sollten die Einflussfaktoren noch differenzierter und in einem breiteren Untersuchungsspektrum betrachtet werden. Im Bereich der **Düsen-technik** sind noch viele Variationen in Bezug auf den Einsatz im Gewinnungsbereich der Steinkohle denkbar. In erster Linie könnten die Untersuchungen hinsichtlich der Luft-Wasser-Bedüsung fortgesetzt werden. Die Referenzversuche zeigen, dass ein Einsatz am Walzenlader wegen der hohen Luftgeschwindigkeit im Streb nicht sinnvoll ist. Dabei wurde aber nicht beachtet, dass die Luftgeschwindigkeit direkt am Walzenkörper nicht immer identisch mit der Wetterströmung im Streb ist. Weiterhin könnte anstelle der verwendeten Vollkegelstrahldüse auch eine andere Düsenbauform mit Wasser-Luft-Technik Anwendung finden. In jedem Fall ist dabei zu untersuchen, mit welcher Geschwindigkeit die Tropfen einer Luft-Wasser-Düse noch effektiv für die Staubbinding zur Verfügung stehen. Dabei müssen wie bereits angesprochen die wesentlichen Einflussfaktoren mit betrachtet werden. Denn neben dem Abdriften der Tropfen reagieren kleinere Tropfen in warmer Umgebung anders als größere. Es ist anzunehmen, dass die Verdunstung stärker ist als bei größeren Tropfen. Dies kann so weit gehen, dass weniger Tropfen zur Staubbinding zur Ver-

fügung stehen.

Grundsätzlich sind auch andere Düsenbauformen denkbar. So gibt es im Agrarbereich spezielle Injektordüsen die nach einem ähnlichen Ejektorsystem wie bei der Deutschen Steinkohle funktionieren. Allerdings wird hierbei die Luftzufuhr über die Düse geregelt. Der Hersteller garantiert eine hohe Abdriftsicherheit.

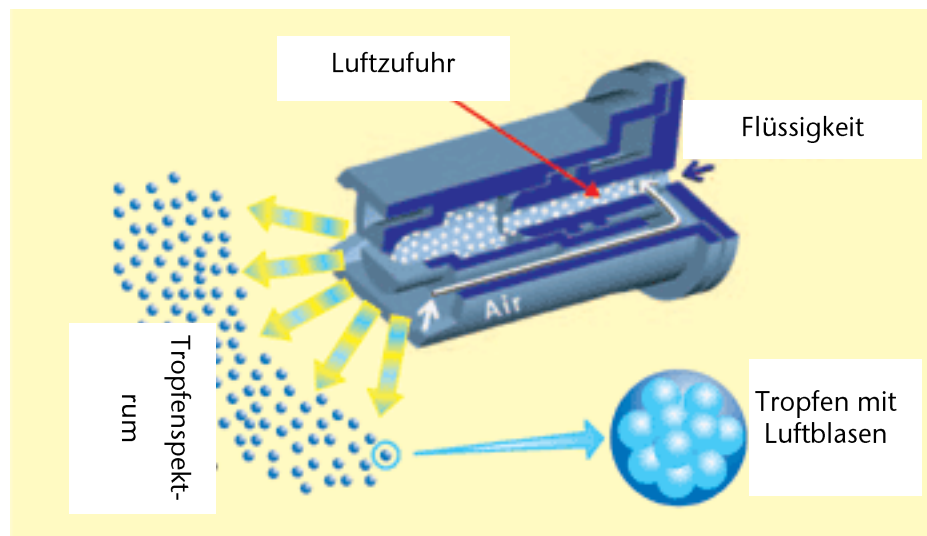


Abbildung 137: Injektordüse der Firma Agrotop, Obertraubling

Im Bereich der **Betriebsparameter** ist bei der vorgestellten Düsentechnik der betrachtete Druckbereich von 30 bis 80 bar und der daraus resultierende Volumenstrom mehr als ausreichend. In Zusammenhang mit etwaigen anderen Düsen sind diese Parameter sicherlich einer erneuten Prüfung zu unterziehen.

Die im Rahmen dieser Versuchsreihen dargestellten **äußeren Einflussfaktoren** bilden Grenzbereiche ab. Für eine genaue Betrachtung, insbesondere auch der quantitativen Bewertung, sollten auch Zwischenbereiche untersucht werden.

Bei den **Zusatzstoffen** sollten noch ergänzende Versuche unter Berücksichtigung der äußeren Einflussfaktoren gemacht werden. Für eine Reihe von entsprechenden Dauerversuchen, ist es allerdings erforderlich, dass die Anlagensicherheit gegenüber Explosions- Schutz optimiert wird.

Hinsichtlich des **Versuchsstands** kann die Tropfenanalyse noch erweitert werden. Im Rahmen eines erweiterten Forschungsvorhabens wurde bereits in einem anderen Versuchsstand der Sprühkegel abschnittsweise hinsichtlich der Tropfenverteilung untersucht. Ein derartiger Versuchsaufbau könnte auch in den hier beschriebenen Versuchsstand integriert werden. So ist es denkbar, das Laserbeugungsgerät nicht fest, sondern auf einem automatisch verfahrbaren Schlitten anzuordnen. Dadurch könnten beispielsweise der Sprühkegel und die Auswirkungen der Luftgeschwindigkeit untersucht werden. Auch der sogenannte Nachbarschaftseffekt kann detailliert untersucht werden.

Das Laserbeugungsgerät könnte auch im Bereich der Staubbmessung eingesetzt werden. Zwar würden in diesem Bereich, wie auch beim Tyndallometer, auch Wassertropfen eingesetzt werden, man bekäme jedoch einen Überblick über die vorhandenen Korn- bzw. Tropfengrößen. Die lichtoptischen und gravimetrischen Messungen ermitteln nur die Menge bzw. den Massenstrom an Staubpartikeln, die kleiner als eine bestimmte Größe sind. Es wurde bisher nicht ermittelt, welche Größe die Partikel haben, die für eine Bewertung unter arbeitsmedizinischen Aspekten sinnvoll sein könnte.

Im Hinblick auf den Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit bleiben Faktoren weiterhin als nicht umsetzbar bestehen. Der Luftdruck kann nicht unabhängig vom Umgebungsdruck eingestellt werden, da der Versuchskanal nicht als eine abgeschlossene Druckkammer ausgebildet werden kann. Bei der Luftfeuchtigkeit können ggf. Verdampfer eingesetzt werden, die der Luft kontinuierlich Feuchtigkeit zufügen. Alternativ wäre ggf. eine zusätzliche Flächenheizung an jedem Segment denkbar. Somit käme die Wärme nicht nur durch einen warmen Luftstrom, sondern würde kontinuierlich dem Prozess zugeführt. Eine derartige Anordnung würde der zuströmenden Gebirgswärme entsprechen. Durch die kontinuierliche Wärmezufuhr würde ggf. auch eine kontinuierliche Verdunstung erreicht werden.

Angesichts dessen, dass es somit Faktoren gibt, die eine vollständige Abbildung der Vor-Ort-Bedingungen nicht ermöglichen, bedarf es einer vergleichenden Untersu-

chung mit Messungen vor Ort. Die daraus ergebenden Zusammenhänge ermöglichen es dann, dass der Versuchsstand auch eine höhere Aussagensicherheit erhält.

12.2 Potentielle Einsatzbereiche im untertägigen Bergbaubereich

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Verhältnisse im Steinkohlenbergbau zugrunde gelegt. Der Versuchsaufbau ermöglicht aber auch Untersuchungen in anderen Bergbaubereichen und im Tunnelbau.

Im deutschen **Kali- und Salzbergbau** werden Fahrzeuge zum Besprühen der Sohle eingesetzt. Die dabei versprühte Flüssigkeit hat die Aufgabe den vorhandenen Staub zu binden. Darüber hinaus kommt es zu einer Verfestigung der Fahrwege. In tiefen Kaliabbauen, ist die Staubentwicklung besonders hoch. Es gab hierzu Überlegungen, durch das Versprühen von Flüssigkeit nicht nur den Staub zu binden, sondern auch die Umgebungsluft zu kühlen. Hierbei wäre der Zielkonflikt zwischen Staubbindung sowie Kühlung und der Veränderung der klimatischen Bedingungen zu untersuchen.

Die Untersuchung hinsichtlich des Versprühens von Wasser auf Fahrwegen hat nicht nur staub- und climatechnische Aspekte, sondern kann sich auch auf die **Maschinentechnik** auswirken. In manchen Bergbaubereichen werden salzhaltige Wässer versprüht. Der Sprühnebel führt an dem Trägerfahrzeug zu Korrosionen und zu technischen Ausfällen. Hier ließe sich auch eine Optimierung vornehmen.

Für den Bereich des **Tunnelbaus** gab es Untersuchungen zum Einsatz von Wasser-Nebel-Düsen u. a. auch an den bisherigen Versuchsständen der DMT und der Bergbauforschung. Ziel war es dabei aber in erster Linie die Meißelkühlung, zur Reduzierung der Brandgefahr, zu optimieren. Staubtechnische Aspekte wurden aufgrund nachgeschalteter Absaugtechniken bisher nicht berücksichtigt. Die heutigen Tunnelbaustellen haben immer zunehmend größere Teufen und Längen, so dass die Klimatisierung immer häufiger eine Rolle spielt. So ist es denkbar, dass unter dem

Gesichtspunkt der Auswirkungen auf die Bewetterung Untersuchungen zu einer Optimierung vorgenommen werden.

13 Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurde eine Reihe von Untersuchungen vorgenommen, um den bei der Gewinnung von Steinkohle entstehenden Staub zu minimieren. Dazu wurden auch Versuchsstände aufgebaut, um verschiedene Einflussfaktoren wie Temperatur und Druck des Bedüsungswassers, Tropfengröße etc. zu untersuchen. Die Faktoren wurden hierbei in der Regel getrennt voneinander und ohne Betrachtung möglicher Wechselwirkungen untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer Versuchsstand auf Basis der alten Versuchsaufbauten konzipiert. Ziel ist es, Möglichkeiten zur Abbildung der Einflussfaktoren bei der Staubbildung zu überprüfen und Erkenntnisse über Wechselwirkungen zu erarbeiten.

Für eine realitätsnahe Abbildung einer Bedüsungssituation werden zunächst die Grundlagen der Staubbildung im Steinkohlenbergbau und die dabei angewendete Messtechnik beschrieben. Weiterhin wird eine Übersicht über die Einflussfaktoren Düsentechnik, Betriebsparameter, äußere Einflussfaktoren und Zusatzfaktoren gegeben.

Die Düsentechnik befasst sich mit der konstruktiven Ausführung der Düse und dem sich daraus ergebenden Sprühbild. In erster Linie unterscheiden sich die Düsen nach der Art der Energiezufuhr in Einstoffdruck- und Zweistoffdüsen sowie Rotations- und Ultraschallzerstäuber. Im Deutschen Steinkohlenbergbau werden bisher nur die erstgenannten Düsen eingesetzt. Sie erhalten die notwendige Oberflächenenergie aus der kinetischen Energie der zu zerstäubenden Flüssigkeit. In Bezug auf das bereits erwähnte Sprühbild lassen sich strahlbildende und lamellenbildende Einstoffdüsen unterscheiden.

Bei den Betriebsparametern werden die Faktoren Volumenstrom, Spritzwinkel, Strahlkraft, Tropfengröße, Flüssigkeitsdruck und die Stoffeigenschaften der Flüssigkeit untersucht.

Weiterhin werden die Beeinflussung durch Luft und die Umgebungswärme als äußere Einflussfaktoren dargestellt. Wesentliche Auswirkungen ergeben sich durch das Abdriften sowie durch Volumenänderung infolge von Abkühlen oder Erwärmen der Flüssigkeitstropfen.

Darüber hinaus gibt es Zusatzstoffe in Form von Tensiden, die als Einflussfaktoren auf die Staubreduzierung einwirken. Diese Stoffe verändern die Oberflächeneigenschaft, so dass sich das Staubbindervermögen verbessert.

Im Deutschen Steinkohlenbergbau sind die Bedüsungssysteme auf die jeweilige Gewinnungsmethode angepasst. Bei der schälenden Gewinnung sind die Düsen am Ausbau angeordnet und befeuchten den Gewinnungsraum abschnittsweise in Abhängigkeit zur Stellung des Hobels. Bei der schneidenden Gewinnung sind die Düsen Bestandteile des Walzenkörpers. Es kommen dabei zwei Verfahren, das Ejektorsystem und die Hochdruckschneidspurbedüsung, zum Einsatz. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird exemplarisch die Hochdruckschneidspurbedüsung der schneidenden Gewinnung betrachtet.

Auf Grundlage von Normen, den Erkenntnissen aus bisherigen Untersuchungen und grundsätzlichen Überlegungen zum realitätsnahen Abbilden verschiedener Bedüsungssituationen wird der Versuchsstand im Querschnitt rechteckig und mit einer Kantenlänge von einem Meter aufgebaut. Die gesamte Strömungslänge beträgt mehr als zwanzig Meter. Der Versuchsstand wird aus mehreren Segmenten zusammengesetzt, und besteht aus einer Ansaugstrecke, einem Staubaufgabebereich, einem Bedüsungsbereich, einer Beruhigungszone und einem Bereich zur Staubentnahme. Für die Luftbewegung wird ein saugender Lüfter verwendet.

Im Bedüsungsbereich werden mehrere Öffnungen vorgesehen, die je nach Bedarf genutzt werden können. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Bedüsungsrichtungen und entsprechende Bedüsungssysteme in die Versuchsstrecke integrieren. Für die realitätsnahe Abbildung verschiedener Systeme werden entsprechende Meißelhalter aus der Walzenbedüsung an einen Deckel montiert und mit

entsprechenden Düsen der Hochdruckschneidspurbedüsung bestückt. Für die Hobelgassenbedüsung werden ebenfalls analog zur Anordnung am Ausbau entsprechende Düsenhalter konzipiert. Das Bedüsungswasser kann entweder aus dem vorhandenen Wassernetz oder aus einem Zwischenspeicher über eine Druckerhöhungspumpe zugeführt werden.

Das Wasser im Zwischenspeicher lässt sich den Anforderungen entsprechend auch erwärmen. Die Erwärmung wird in entsprechenden Vorversuchen kalibriert, so dass Wärmeverluste auf dem Weg vom Zwischenspeicher zur Düse berücksichtigt werden können.

Die Abbildung der Staubentwicklung ist problematisch, da der Ejektorkanal, der den Staub in den Kanal bläst, durch das Bedüsungswasser befeuchtet wird und es so zu einer Verklumpung des Staubs kommt. In einer Versuchsreihe mit unterschiedlichen Ejektorluftdrücken und wahlweisem Abstand zwischen Staubaustritt und Meißelspitze wird die optimale Position der Staubaufgabe ermittelt.

Bei der Abbildung der Umgebungseinflüsse können die Temperaturen in dem Messbereich nahezu annähernd konstant gehalten werden. Es zeigt sich eine deutliche Abkühlung der Luft durch die Bedüsung. Anhand verschiedener Messfühler und der Ermittlung des Wärmeverlusts lässt sich die gewünschte Temperatur regulieren. Im Gegensatz dazu, lässt sich die Luftfeuchtigkeit nicht durch Wasserdampf auf einen konstanten Wert erhöhen, so dass auf die Betrachtung dieses Faktors verzichtet werden muss. Die Luftgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit zu der Lüfterdrehzahl ermittelt. Es lassen sich unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche von 0,90 m/s bis 5,04 m/s darstellen. Damit lassen sich unterschiedliche Bedüsungssysteme realitätsnah abbilden.

Hinsichtlich der Messtechnik kann im Staubkanal sowohl die Tropfengröße spezifiziert als auch die Staubkonzentration ermittelt werden. Für die Ermittlung der Tropfengröße steht ein Laserbeugungsgerät zur Verfügung, welches direkt im Bedüsungsbereich angeordnet ist.

Für die Messung der Staubkonzentration kann das im Steinkohlenbergbau verwendeten Tyndallometer sowie das gravimetrische Messgerät TBF 50 eingesetzt werden. Darüber hinaus ist auch eine isokinetische Out-Stack Probenahmeeinrichtung vorgesehen. Somit kann man gravimetrische und lichtoptische Staubbmessungen durchführen. Laut der zugehörigen DIN-Norm muss sich die Staubentnahme in einem homogenen und möglichst stabilen Strömungsbereich befinden. Entsprechend werden entlang des Strömungskanals Messungen der Luftgeschwindigkeit durchgeführt und eine optimale Position nachgewiesen. Die Umgebungseinflüsse werden mit standardisierten Messinstrumenten wie S-Pitot-Rohr und Strömungskreuz für die Luftgeschwindigkeit ermittelt. Über einen Computer und das Datenerfassungsprogramm Daisy Lab können die einzelnen Daten erfasst und visuell dargestellt werden.

Insgesamt betrachtet, lassen sich mit dem vorliegenden Versuchsaufbau nunmehr alle Bereiche früherer Versuchsstände und damit alle wesentlichen Komponenten und Umgebungseinflüsse nachvollziehen und darstellen. Zudem lassen sich auch weitere Optionen wählen, die eine realitätsnahe Messung der Staubmenge gewährleisten. Durch den gleichzeitigen Einsatz von Tropfenanalyse und Staubbmessung können darüber hinaus Ursache und Wirkung optimal bewertet werden.

Anhand einer Reihe von Versuchen werden die wesentlichen Einflussfaktoren wie Betriebsparameter (Volumenstrom und Tropfengröße), äußere Einflussfaktoren und Zusatzstoffe betrachtet.

Als Ergebnis stellt sich heraus, dass bei einer druckbedingten Änderung des Volumenstroms kein linearer Zusammenhang zu der Reduzierung der Staubmenge besteht. Weiterhin zeigt sich, dass nicht der Betrag der druckbedingten Änderung des Volumenstroms, sondern die absolute Menge des Wassers entscheidend für die Staubreduzierung ist. Verändert man den Volumenstrom durch den Düsendurchmesser, so zeigt sich, dass die Verringerung der Intensitätswerte nicht proportional zu der durch die Änderung des Düsendurchmessers hervorgerufenen Zunahme des Volumenstroms ist.

Im Hinblick auf die druckbedingte Änderung der Tropfengröße lässt sich feststellen, dass das Verhältnis Tropfendurchmesser zu Intensitätswert über den betrachteten Druckbereich annähernd proportional ist. Die absolute Höhe der Staubreduzierung wird jedoch nicht durch die Tropfengröße, sondern auch hier durch den Volumenstrom, also durch die absolute Wassermenge bestimmt.

Bei einer Veränderung der Tropfengröße durch einen anderen Düsendurchmesser zeigt sich, dass die Höhe der Staubreduzierung von der Änderung des Sauterdurchmessers bestimmt wird. Anhand dieser Ergebnisse zu den Betriebsparametern lässt sich ein Optimierungsansatz bei der Bedüsung aufzeigen: Durch den Einsatz einer größeren Düse lässt sich mit einem geringeren Druck eine bessere Staubreduzierung erzielen. Allerdings hat dies eine Erhöhung des Wasserbedarfs zur Folge.

Hinsichtlich der äußeren Einflussfaktoren lässt sich feststellen, dass sich bei Verwendung von warmem Wasser die Oberflächenspannung verändert; somit entstehen kleinere Tropfen. Bei einem Temperaturgefälle zwischen Flüssigkeit und Wasser unterscheiden sich die Ergebnisse je nach Situation. Bei warmem Wasser und kälterer Umgebungsluft ist die Staubbindung schlechter als bei Wasser mit Umgebungstemperatur. Wenn kühleres Wasser in eine wärmere Umgebung gesprüht wird, kommt es zur Kondensation und die dabei entstehenden Wassertropfen unterstützen die Staubbindung.

Wenn kein Temperaturgefälle zwischen Wasser und Luft vorhanden ist, lässt sich mit kühlerem Wasser in kühlerer Luft eine bessere Staubreduzierung erreichen.

Im Gegensatz zu thermischen Einflussfaktoren bewirkt die durch Tenside hervorgerufene Änderung der Oberflächenspannung nicht nur eine Verkleinerung der Tropfengröße, sondern auch eine verbesserte Staubbindung.

14 Abstract

A series of studies was conducted over the past years in the sector of hard coal mining with the objective to reduce the volume of dust generated in the mining process. The series included the construction of test rigs, in which various influencing factors were examined separately, and without consideration of possible reciprocal effects.

A new dust control testing rig will be designed within the scope of this work. Its objective is to find options for mapping influencing factors with the help of a nozzle system for dust binding, and to develop insights regarding reciprocal effects. Based on fundamental insights regarding dust generation, dust measuring technology and measures to control dust by way of nozzle systems, this work will provide a specific overview of the current state of technology in terms of nozzle systems, based on the various nozzle types available, their relevant spray patterns and operational factors. Additionally, external factors and additives for the improvement of the dust binding capacity will be discussed.

As a next step, the adapted nozzle systems used for the various mining methods will then be described for application in the design of the own test rig. Reference tests from literature and practical trials are discussed, and their results compared and evaluated. The test rig constructed at the institute for Mining will then be discussed in detail regarding fundamental approaches in terms of planning and distribution of the various basic components and measuring systems on the rig itself. The design of the test rig will be based on a as close to realistic as possible representation of the various nozzle systems and influencing factors. Depending on requirement, the dimensions of the individual components and measuring systems will have to be based on previous test runs.

As a result of all the planning, a test rig with an overall flow path length of over 20 m was created, consisting of a heatable suction path, a dust infeed area, a spraying

area, a settling area and an area where the dust is removed. A controllable blower provides the required airflow. With relevantly placed measuring devices, gravimetric as well as light optic dust measurements can be conducted, and standard tools provide information regarding airspeeds and temperatures. The various data types are then captured by way of a computer and subsequently visualised. The test rig described above can be used to recreate and show all the areas of previous test rigs with appropriate signage.

Within the scope of subsequent test series, the most relevant operating parameters will then be tested in selected nozzle type variations, several external influencing factors will be tested, including additives. In terms of dust reduction, the series of tests provided the following insights. In contrast with the absolute volume of the water used for spraying, the pressure-related change in volume flow alone did not provide any improvement in dust suppression.

The same applies for a pressure-related change of drop size; the intensity value remains almost proportional for the pressure range examined. The only factor influencing optimisation is the volume of water. As an optimisation approach it may be noted that a larger nozzle with less pressure can achieve better dust reduction results; this will, however, result in an increased water requirement. In terms of external influencing factors, temperature differences between the spray water and the ambient temperature can be noted due to the changed surface tension. Dust control is less successful with warm water and colder ambient temperatures. If, however, colder water is used for spraying a warmer environment, the resulting condensation will lead to increased drop formation, and therefore improved dust control. The use of tensides will result not only in a decrease in drop size formed due to changed surface tension, but will also improve dust control.

15 Literaturverzeichnis

- /1/ DIN EN 481, Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel; Beuth Verlag 1993, Berlin
- /2/ DIN 13284-1, Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen Teil 1; Beuth Verlag 2002, Berlin
- /3/ DIN VDI 2066, Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung, Beuth Verlag 1999, Berlin
- /4/ IBR Zerstäubungstechnik, www.duesen.biz
- /5/ Firmenunterlagen Firma Cognis, Düsseldorf, www.cognis.com
- /6/ Firmenunterlagen Firma Hund, Wetzlar, www.hund.de
- /7/ Firmenunterlagen Firma Korfmann, Witten, www.korfmann.com
- /8/ Firmenunterlagen Firma Lechler, Metzingen, www.lechler.de
- /9/ Firmenunterlagen Firma MC GmbH, Ostfildern, www.mc-gmbh.eu
- /10/ Firmenunterlagen Firma Spraying Systems, Hamburg, www.spray.de
- /11/ Firmenunterlagen RAG Deutsche Steinkohle, www.rag-deutsche-steinkohle.de
- /12/ Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten – Gesundheitsschutzbergverordnung vom 31.07.1991, BGBl. I S. 1751

- /13/ ISO 13320-1, Particle size analysis - Laser diffraction methods, Beuth Verlag 1999, Berlin
- /14/ Klimabergverordnung des Landes Nordrhein-Westfalen vom 09.06.1983, BGBl. I S. 685, <http://esb.bezreg-arnsberg.nrw.de>
- /15/ Mineralischer Staub, Informationsmaterial Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie Branche Baustoffe - Steine – Erden <http://www.stbg.de/>
- /16/ Planungsunterlagen Wettertechnik der DMT, Essen, unveröffentlicht
- /17/ VDI/VDE Richtlinie 2640, Blatt 1 bis 3; Bestimmung des Gasstroms in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt; Beuth Verlag 1983, Berlin
- /18/ Armbruster, L. et al.
Untersuchung zur Wirkung von gekühltem Wasser bei der Staubreduzierung, Silikosebericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Band 13, Verlag Glückauf 1980, Essen
- /19/ Ardelt, M. G.
Untersuchung der lokalen Geschwindigkeits- und Tropfenverteilung an einer Einstoff-Vollkegelstrahldüse bei unterschiedlichen Wettergeschwindigkeiten, Staub- und Silikosebericht Nordrhein-Westfalen Band 19, Steinkohlenbergbauverein 1997, Essen
- /20/ Baumbach G.
Luftreinhaltung, 3. Auflage, Springer-Verlag 1993, Heidelberg
- /21/ Baumgartner, A. et al.
Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie Bd. 1, 2. Auflage, Gebr. Borntraeger 1996, Berlin-Stuttgart

- /22/ Beez, R.
Planung und Überwachung in der Wetterführung, Vortrag im Rahmen des WVB-Seminars: EDV-Seminar für Bergreferendare und junge Führungskräfte im Bergbau, unveröffentlicht
- /23/ Brauer, H.
Grundlagen der Einphasen und Mehrphasenströmungen, Verlag Sauerländer Aarau 1971, Aarau Schweiz
- /24/ Breuer, H.
Untersuchungen über Staubbmessungen in Kohlengewinnungsbetrieben für die Zwecke der Staubhygiene unter Berücksichtigung der in Deutschland angewandten optischen Verfahren, Dissertation TU Clausthal 1955
- /25/ Büchte, S.
Epidemiologie als Werkzeug zur Erfolgskontrolle für die Begrenzung der Staubbelastung im Steinkohlenbergbau an der Ruhr für den Zeitraum 1974 – 1998, Dissertation TU Clausthal 2007
- /26/ Dietze, J.
Wirkung von Tensiden in der Staubbekämpfung im untertägigen Bergbau, Diplomarbeit TU Clausthal- unveröffentlicht –
- /27/ Henke, B. et al.
Erhöhung der Sicherheit im Streb durch Minimierung der Zündgefahr und der Staubentwicklung am Walzenlader für Gesteinsmitschnitt und Störungsdurchörterung, DMT-Bericht 110 2001, Bochum
- /28/ Henke, B. et al.
Fördermengenabhängige Bedüsung für die schälende Kohlengewinnung Glückauf Nr. 131 Heft 9, Verlag Glückauf 1995, Essen

- /29/ Henke, B. et al.
Wirtschaftliche und sicherheitliche Grenzen des Hochdruckwassereinsatzes am Walzenlader, Staub- und Silikosebericht Nordrhein-Westfalen Band 20, Steinkohlenbergbauverein 1998, Essen
- /30/ Henke, B. et al.
Hochdruckwasserbedüsung im Bereich Streb-Strecke und daraus abzuleitende Rückschlüsse auf die Hobelgassenbedüsung, Staub- und Silikosebericht Nordrhein-Westfalen, Band 21, Steinkohlenbergbauverein 1999, Essen
- /31/ Henke, B. et al.
Optimierung von Hobelbedüsungsanlagen, Glückauf Nr. 127, Heft 15/16, Seite 662 ff, Verlag Glückauf 1991, Essen
- /32/ Henke, B. et al.
Planungshilfen für die Staubbekämpfung am Walzenschrämlader, Glückauf Nr. 127 Heft 15/16, Seite 763 ff., Verlag Glückauf 1991, Essen
- /33/ Hesse, F.
Über Einflüsse auf den Umrechnungsfaktor zwischen tyndallometrischen und gravimetrischen Feinstaub-Messwerten, Dissertation RWTH Aachen 1992
- /34/ Hubig, P.
Wettergeschwindigkeiten und Wetterströme im Streb; Glückauf Nr. 110, Seite 566 ff., Verlag Glückauf 1974, Essen
- /35/ Kissel, F. N.
Handbook of Dust Control in Mining, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) 2003, Pittsburg

- /44/ Röttger, K.
Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der Feinstaubkonzentration in Hobelstreben auf der Grundlage betrieblicher Einflussgrößen, Dissertation TU Clausthal 1983
- /45/ Sachs, L.
Statistische Methoden, Springer Verlag 1970, Berlin
- /46/ Seewald, H.
Laboruntersuchungen über die Eignung von Zusatzmitteln zur Verbesserung der Staubbekämpfung mit Wasser, Staub- und Silikosebericht Nordrhein-Westfalen Band 15, Steinkohlenbergbauverein 1985, Essen
- /47/ Schöninger, M.
Hydrogeologie, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, TU Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
- /48/ Schwengfelder, Ch.
Einfluss von Wassernebelbedüsung auf das Grubenklima, Seminararbeit TU Clausthal 2006 - unveröffentlicht –
- /49/ Schröter, K. H. et al.
Taschenbuch der Chemie, Verlag Harri Deutsch 1995, Frankfurt
- /50/ Sonntag D.
Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis. (1. Aufl.), VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1982, Leipzig
- /51/ Sonntag, H.
Lehrbuch der Kolloidwissenschaften, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1977, Ost-Berlin
- /52/ Stieß, M.
Mechanische Verfahrenstechnik Band 2, Springer Verlag 1993, Berlin-Heidelberg

- /53/ Voss, J.
Grubenklima, Glückauf-Betriebsbücher, Verlag
Glückauf 1981, Essen
- /54/ Wesely, R.
Wettertechnik, Internet Veröffentlichung,
www.grubenbewetterung.de
- /55/ Wilhelm, H.
Untersuchung zu Temperatur und Energieum-
sätzen bei schneidender Gesteinszerstörung
mit Teilschnitt-Vortriebsmaschinen, Dissertati-
on TU Clausthal 1992
- /56/ Wozniak, G.
Zerstäubungstechnik, Springer-Verlag 2002,
Berlin

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Ron Alexander SPIER
Geburtsdatum	16.09.1976
Geburtsort	Hannover
Wohnort	Lehrte

Beruf und berufliche Ausbildung

Seit 04.2008	Projektingenieur bei der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (DBE) mbH, Fachabteilung Bergbau und Maschinentechnik, Projekt Konrad
01.2004 bis 03.2008	Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Bergbau, TU Clausthal, Abteilung Maschinelle Betriebsmittel und Verfahren im Bergbau unter Tage
1997 bis 2003	Verschiedene Praktika im Rahmen einer Bergbaubeflissenen-ausbildung im Kali- und Steinsalzbergbau, Stein- und Braunkohlenbergbau sowie im Erzbergbau
1997 bis 2004	Studium „Geotechnik, Bergbau, Erdöl-/Erdgastechnik“ an der TU Clausthal; Schwerpunkt; Untertägige Mineralgewinnung
1996	Abitur an der Lutherschule Hannover